



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos

PROYECTO FIN DE CARRERA

COLECTORES SOLARES
TÉRMICOS FRENTE A PANELES
SOLARES TERMODINÁMICOS.
APLICACIÓN PARA ACS.

Autor: Juan Carlos Pérez Mayorga

Tutor: Amancio Moreno Rodríguez

Leganés, Septiembre de 2012



INDICE GENERAL

INDICE GENERAL.....	2
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	5
1.1. Introducción.....	5
1.2. Objetivos del proyecto.....	7
1.3. Estructura de la memoria.....	8
2. DATOS METEOROLOGICOS DE PARTIDA.....	9
2.1. Datos de Temperatura Ambiente.....	9
2.1.1. Datos Iniciales: Evolución de la Temperatura Ambiente.....	9
2.1.2. Cálculo de la Temperatura Ambiente Media Diaria.....	10
2.1.3. Cálculo de la Temperatura Ambiente Media Mensual.....	12
2.2. Datos de Radiación Solar.....	13
2.2.1. Datos Iniciales: Evolución de la Radiación Solar.....	13
2.2.2. Cálculo de la Radiación Incidente Media Diaria sobre plano inclinado.....	15
2.2.3. Cálculo de la Radiación Diaria Media Mensual sobre plano inclinado.....	17
3. CÁLCULO DE LA DEMANDA ENERGÉTICA.....	19
3.1. Introducción al cálculo de la demanda energética.....	19
3.2. Cálculo del consumo de agua caliente sanitaria.....	20
3.3. Cálculo de la demanda energética mensual.....	23
3.4. Cálculo de la Demanda Energética Media Diaria.....	25
3.5. Cálculo de la Evolución de Demanda Energética a lo largo del día.....	28
4. PANELES SOLARES TERMODINÁMICOS.....	33
4.1. Introducción a los Paneles Solares Termodinámicos.....	33
4.1.1. Orígenes de la Termodinámica. Ciclo de Carnot.....	33
4.1.2. Origen de los paneles solares termodinámicos.....	35
4.1.3. Esquemas Comerciales de Instalaciones de Paneles S. Termodinámicos.....	35
4.2. Esquema General de una Instalación de Agua Caliente Sanitaria con Paneles Solares Termodinámicos.....	38
4.2.1. Características de los Paneles Solares Termodinámicos.....	39
4.2.2. Instalación de los Paneles Solares Termodinámicos.....	39
4.2.3. Características del Bloque Termodinámico.....	40
4.2.4. Características del Refrigerante.....	41
4.2.5. Características del Depósito de Acumulación.....	42
4.2.6. Características del Intercambiador de Calor.....	43
4.2.7. Características del vaso de expansión.....	43



4.2.8. Características del Circuito del Refrigerante.....	43
4.3. Funcionamiento de la Instalación.....	44
4.4. Cálculos.....	45
4.4.1. Dimensionamiento de la instalación.....	47
4.4.2. Calculo de la Temperatura de Evaporación.....	47
4.4.2.1. Modelo de Ecuaciones para la Temperatura de evaporación.....	47
4.4.2.2. Evolución de la Temperatura de evaporación.....	50
4.4.2.3. Evolución diaria de la temperatura de evaporación.....	53
4.4.3. Cálculo del Coeficiente de Eficiencia Energética o de Operación (COP).....	55
4.4.3.1. Evolución del Coeficiente de Eficiencia Energética o de Operación.....	58
4.4.3.2. Coeficiente de Operación Medio Diario.....	60
4.4.3.3. Coeficiente de Operación Medio Mensual.....	62
4.4.4. Cálculo del Consumo de la Máquina.....	63
4.4.4.1. Consumo Energético Mensual de la Máquina.....	64
4.4.4.2. Consumo Energético Diario de la máquina.....	65
4.4.4.3. Evolución del Consumo Energético a lo largo del día.....	67
5. COLECTORES SOLARES TÉRMICOS PLANOS.....	72
5.1. Introducción a los colectores solares planos.....	72
5.2. Esquema de instalación de agua caliente sanitaria con paneles solares planos.....	73
5.2.1. Funcionamiento de la Instalación.....	74
5.2.2. Elementos principales de una instalación de ACS con paneles s. planos.....	75
5.2.2.1 Captadores Solares Planos.....	75
5.2.2.2 Sistema de Distribución.....	79
5.2.2.3 Tanque de almacenamiento.....	80
5.2.2.4 Sistema de Apoyo Energético.....	81
5.3. Cálculos.....	82
5.3.1. Fracción o cobertura solar.....	82
5.3.1.1 Calculo de la Fracción Solar Mínima.....	83
5.3.2 Calculo de la fracción solar mediante el Método F-chart.....	86
5.3.2.1 Análisis teórico del método F-chart.....	87
5.3.2.2 Cálculo de Fracción Solar Mensual. Dimensionamiento Instalación por el Método F-Chart.....	94
5.3.3 Consumo Energético de la Instalación con paneles solares planos.....	103
5.3.3.1 Evolución Diaria del Consumo Energético.....	103
5.3.3.2 Evolución Mensual del Consumo Energético.....	106
6. COMPARACIÓN ENTRE PANELES TERMODINÁMICOS Y COLECTORES TÉRMICOS.....	107
6.1. Comparación del dimensionamiento de la instalación.....	107



6.2. Comparación del Consumo Energético.....	108
6.2.1. Comparativa del Consumo Energético Diario.....	108
6.2.2. Comparativa del Consumo Energético Mensual.....	111
6.3. Comparativa del Impacto Ambiental. Emisiones de CO ₂	114
7. CONCLUSIONES.....	117
8. BIBLIOGRAFÍA.....	124



1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

1.1. INTRODUCCIÓN.

Desde que la economía basada en el trabajo manual dejó paso a una economía dominada por la industria y la manufactura, a raíz de la Revolución industrial desde principios del siglo XIX, la sociedad ha evolucionado hacia un modelo de mayor consumo de energía, necesaria para los procesos industriales.

El fuerte proceso de industrialización, junto con un alto crecimiento demográfico, han supuesto que los países se vean empujados al uso excesivo de recursos naturales para obtener fuentes de energía eficientes, provocando una gran dependencia de los combustibles fósiles y una fuerte explotación de recursos naturales agotables, poniendo en grave peligro la sostenibilidad de la sociedad.

Ante estos efectos negativos aparece la necesidad de desarrollar un nuevo modelo energético, basado en el consumo controlado y en el uso de medios inagotables, y que tomó forma el 11 de Diciembre de 1997 mediante el Protocolo de Kioto (Japón), en el que se adquiere el compromiso de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y se promueve el uso de energías renovables que ayuden a dicho objetivo.

España, como país miembro, se comprometió a no aumentar sus emisiones por encima del 15% con respecto a las emisiones de 1990, valores que sobrepasamos ya que alcanzábamos emisiones en torno al 40% en 2011, debido a un alto nivel de consumo. Sectores como el transporte obligan a importar petróleo e hidrocarburos, constituyendo un 84% de la energía primaria total comercializada a principios de año 2011.

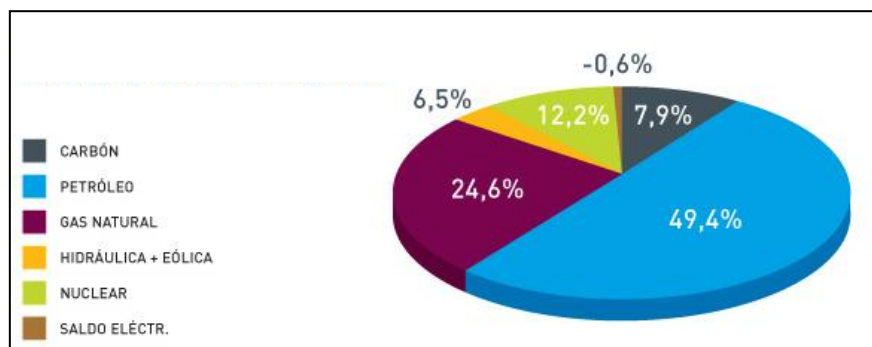


Ilustración 1 Consumo de Energía primaria comercializada en España a principios de 2011. Fuente: Informe Anual 2010 Sedigas.

En cambio, en otros sectores como el eléctrico, España tiene una mayor independencia de la importación de combustibles fósiles. El 38%, aproximadamente, de la electricidad que producíamos y gastábamos a principios de 2011, provenía de fuentes autóctonas como las energías renovables, tanto eólicas, como hidráulicas o solares.

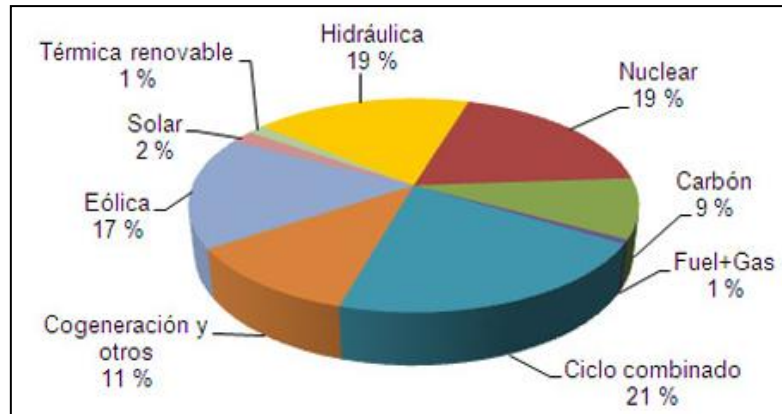


Ilustración 2 Fuentes de Generación Eléctrica en España a principios de 2011. Fuente: Red Eléctrica de España.

Dentro de estas fuentes sostenibles, la **energía solar**, basa su funcionamiento en el aprovechamiento de energía procedente del sol mediante su captación a través de paneles solares. Su posterior transformación en energía térmica o fotovoltaica, constituye el objeto de estudio en este proyecto

España, por su situación geográfica y sus condiciones climáticas, tiene un gran potencial para aprovechar este tipo de energía, y es por esta razón por la que este proyecto se ha centrado en el estudio de aplicaciones que utilizan la energía solar para dar soporte energético a la industria y al uso doméstico.

En este proyecto se va a estudiar y a comparar una de las tecnologías solares mejor desarrolladas hasta la fecha, como son las instalaciones de agua caliente sanitaria basadas en **colectores solares térmicos**, con una tecnología solar menos desarrollada y conocida, basada en paneles que comercialmente reciben el nombre de **paneles solares termodinámicos**.



1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.

El objetivo fundamental de este proyecto es el estudio de un tipo de tecnología solar poco extendida, como son las **instalaciones de agua caliente sanitaria con paneles solares termodinámicos** y su comparación en términos de consumo energético con las instalaciones de agua caliente sanitaria con colectores solares planos, mucho más conocidas.

Para ello, estudiaremos la instalación de agua caliente sanitaria de una **vivienda unifamiliar en Madrid**, con los dos tipos de paneles, cumpliendo con los requisitos establecidos en el Código Técnico de Edificación (CTE).

En base a este objetivo principal, se proponen los siguientes objetivos parciales:

- Estudio y análisis de una instalación de agua caliente sanitaria con **paneles solares termodinámicos**:
 - Conocimiento del funcionamiento de la instalación.
 - Conocimiento y desarrollo de las variables que gobiernan su funcionamiento: Temperatura de evaporación y Coeficiente de Eficiencia Energética u Operación.
 - Cálculo del consumo energético de la instalación.
- Estudio y análisis de una instalación de agua caliente sanitaria con **paneles solares planos**:
 - Estudio del Método de las curvas o F-Chart para el cálculo de la fracción solar.
 - Cálculo del consumo energético de la instalación.
- Comparación del **consumo energético** entre ambas instalaciones.



1.3. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.

Para facilitar la lectura del proyecto, se incluye a continuación un breve resumen de cada capítulo:

- **Capítulo 1. Introducción y objetivos:** se realiza una introducción sobre tecnología basada en la energía solar y se presentan los objetivos del proyecto.
- **Capítulo 2. Datos Meteorológicos de partida:** se presentan los datos de partida del proyecto: temperatura ambiente y radiación solar incidente sobre un plano inclinado, durante un año completo. El **método seguido consiste en concentrar la evolución de todos los días de un mes en un único día representativo medio.**
- **Capítulo 3. Cálculo de la Demanda Energética:** se calculan medidas mensuales, diarias y distribución a lo largo del día, apoyándonos en el Código Técnico de Edificación.
- **Capítulo 4. Paneles Solares Termodinámicos:**
 - Se describen y se explica el funcionamiento de los paneles solares termodinámicos.
 - Se calculan las variables que gobiernan su funcionamiento: temperatura de evaporación, coeficiente de eficiencia energética y consumo energético. El método seguido consiste en concentrar la evolución de todos los días de un mes en un único día representativo medio.
 - Desarrollamos un modelo teórico para la Temperatura de Evaporación, partiendo de estudios experimentales ya desarrollados.
 - Desarrollamos un modelo teórico para el Coeficiente de Eficiencia, partiendo del ciclo de funcionamiento de la instalación.
 - Calculamos el consumo energético mensual, diario y su evolución media representativa.
- **Capítulo 5. Colectores Solares Térmicos Planos:**
 - Se describen y se explica el funcionamiento de los colectores solares térmicos.
 - Se desarrolla el Método de F-Chart, que nos permite obtener la evolución de la fracción solar.
 - Calculamos el consumo energético mensual y diario.
- **Capítulo 6. Comparación entre paneles termodinámicos y colectores térmicos:** se comparan ambas tecnologías en cuanto a dimensionamiento, consumo energético y emisiones ambientales.
- **Capítulo 7. Conclusiones:** Se presentan las principales conclusiones del proyecto.



2. DATOS METEOROLÓGICOS DE PARTIDA.

Como punto de partida de este trabajo, es necesario conocer los datos de las variables meteorológicas que vamos a utilizar en nuestro estudio.

Para ello, hay que señalar que los datos han sido tomados de los registros de la estación meteorológica, situada en **Leganés (Madrid)**.

En esta estación se hallan registradas una serie de variables meteorológicas, entre las que utilizamos para la realización del proyecto, las siguientes:

- 1) Temperatura ambiente del aire.
- 2) Radiación solar sobre el plano inclinado.

Los datos registrados muestran la evolución de estas variables en el año 2010, con mediciones realizadas cada 10 minutos, llegando a manejar 144 mediciones diarias realizadas en las 24 horas de cada día. A continuación, presentamos la evolución de dichos datos.

2.1. DATOS DE TEMPERATURA AMBIENTE.

Para llevar a cabo nuestro estudio necesitamos los valores de **temperatura ambiente** y sus distintos valores medios.

En las siguientes gráficas podemos ver la evolución de la temperatura ambiente que hemos utilizado:

2.1.1. Datos Iniciales: Evolución de la Temperatura ambiente.

Se muestra la evolución de los datos de **Temperatura Ambiente**, medidos en °C, para cada día y mes del año, recopilando los datos en periodos trimestrales:

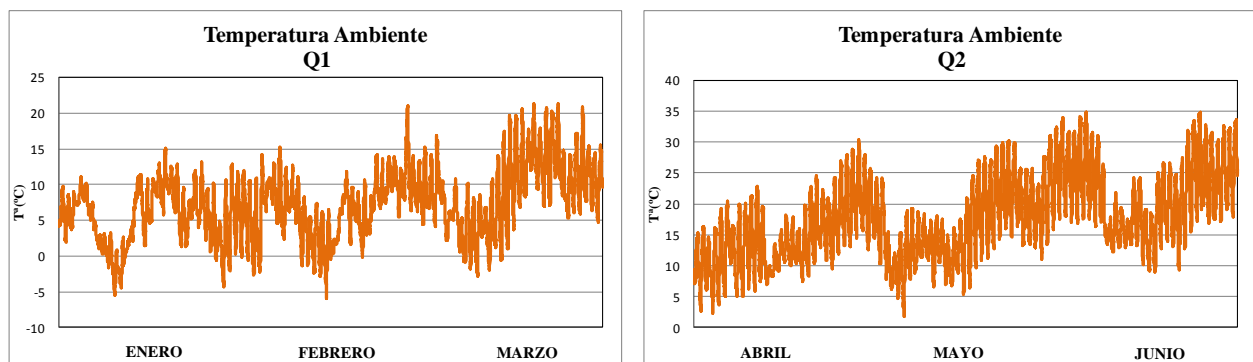


Ilustración 3 Datos Meteorológicos de Temperatura Ambiente (°C) del primer semestre del año.

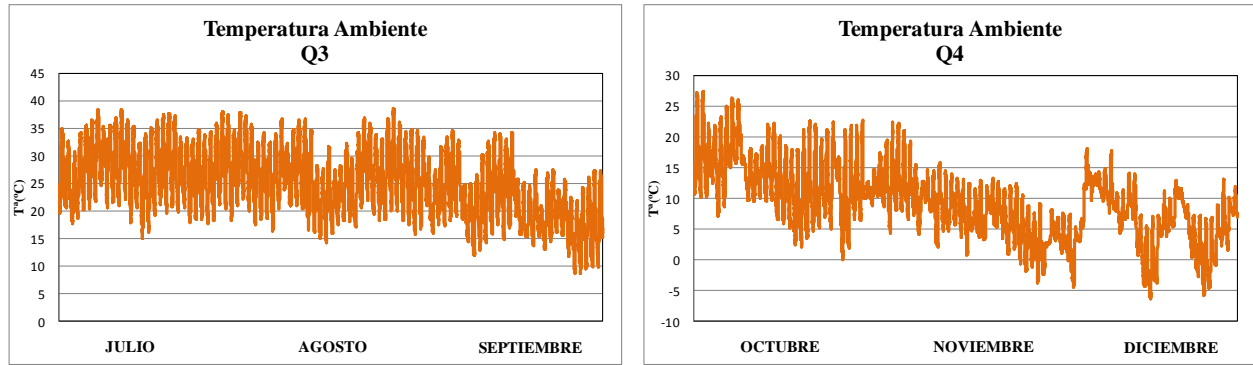


Ilustración 4 Datos Meteorológicos de Temperatura Ambiente (°C) del segundo semestre del año.

Manejamos un gran número de datos para cada día del año, por lo que vamos a trabajar con valores medios representativas de cada mes. El **método que vamos a seguir será concentrar la evolución de todos los días de un mes en un único día medio representativo**. De este modo, promediando las medidas de temperatura ambiente de cada día, tendremos la **evolución media de la temperatura ambiente en un día medio representativo de todo el mes y que concentra todos los días de éste**.

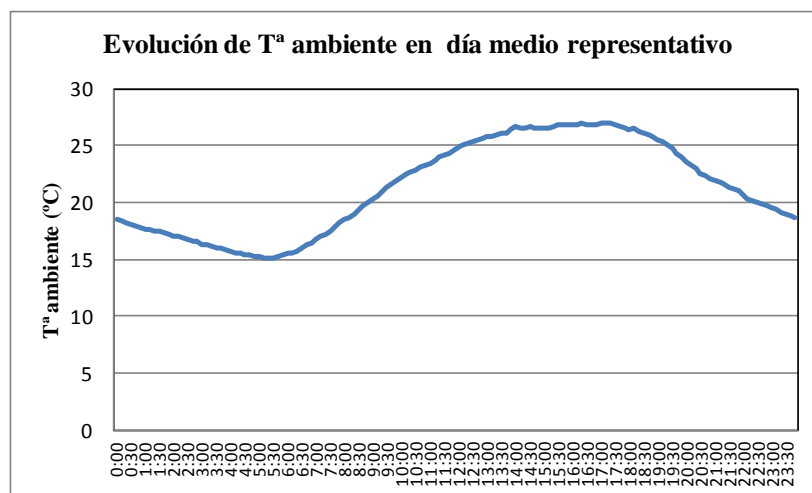


Ilustración 5 Evolución Media de Temperatura Ambiente durante un día medio representativo. Se representa el día medio representativo del mes de Julio, y que concentra una media de todos los días del mes.

Utilizando este método manejaremos **doce días medios representativos**, uno por cada mes del año. Nos servirán para calcular los diferentes parámetros del proyecto.

2.1.2. Cálculo de la Temperatura Ambiente Media Diaria.

Otro método que utilizaremos será representar un valor de temperatura ambiente medio para cada día. Promediando los valores de temperatura ambiente de partida podemos obtener unos valores de **“Temperatura Ambiente Media Diaria”** para cada día del año.

$$T_{dia_i} = \frac{\sum_{j=1}^{144} T_j}{144} \quad \forall i = 1 \dots 365$$



Los resultados obtenidos se presentan gráficamente a continuación:

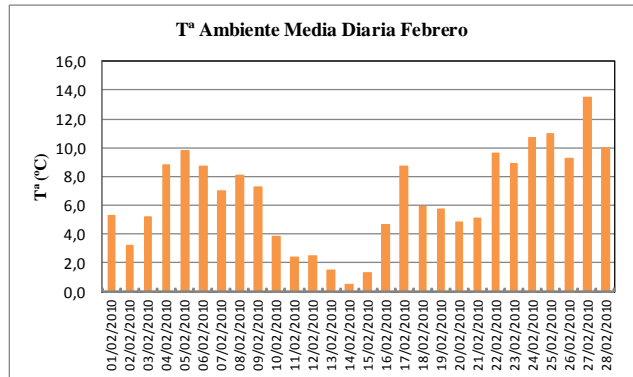
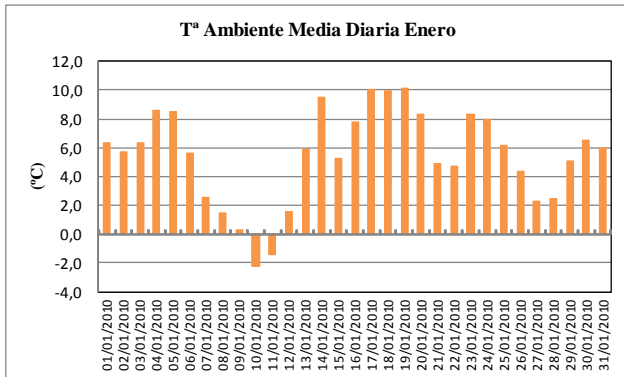


Ilustración 6 Valores diarios de Temperatura Ambiente Media Diaria (°C). Meses de Enero y Febrero.

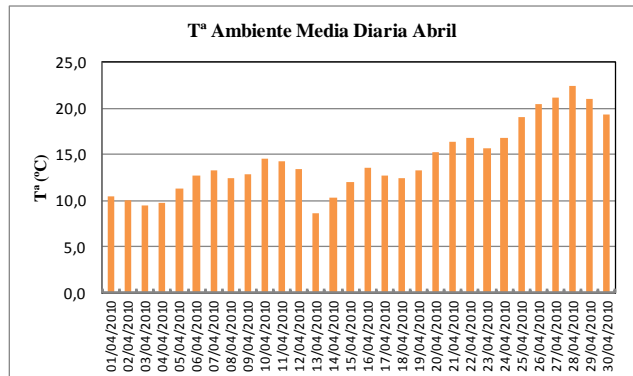
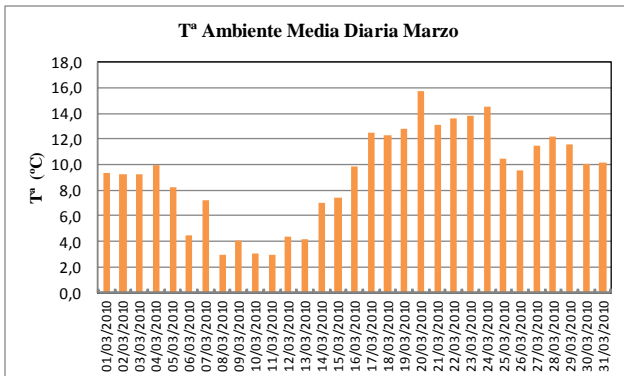


Ilustración 7 Valores diarios de Temperatura Ambiente Media Diaria (°C). Meses de Marzo y Abril.

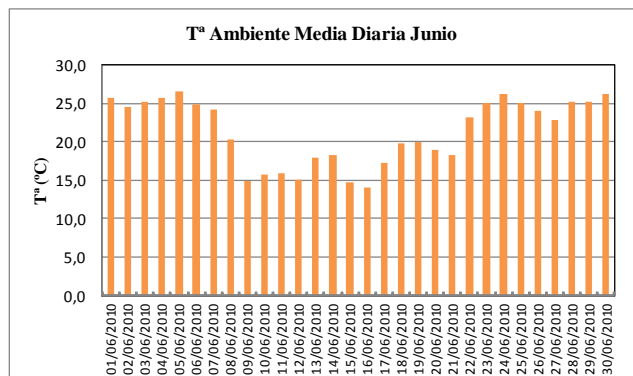
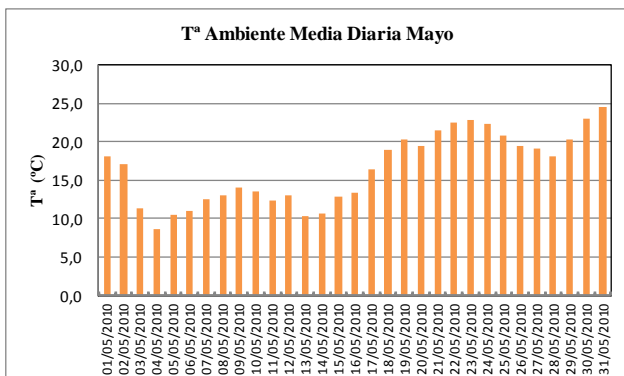


Ilustración 8 Valores diarios de Temperatura Ambiente Media Diaria (°C). Meses de Mayo y Junio.

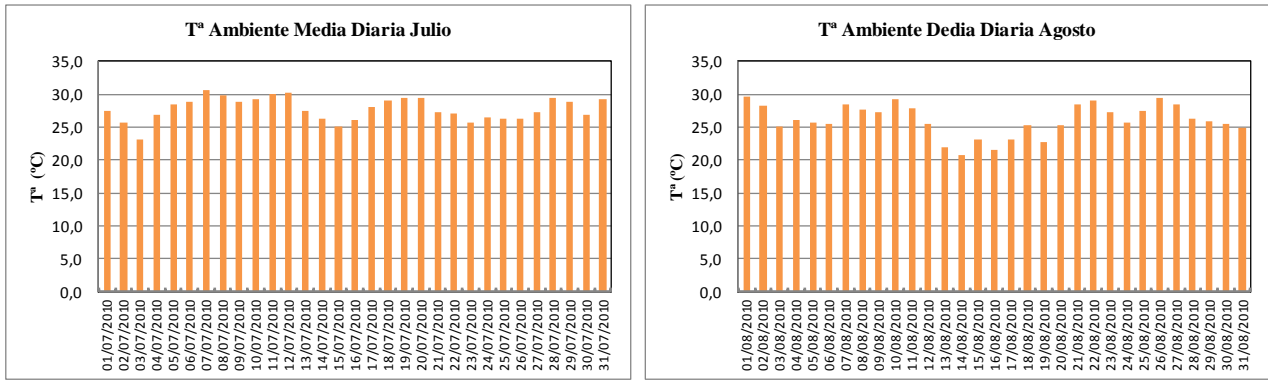


Ilustración 9 Valores diarios de Temperatura Ambiente Media Diaria (°C). Meses de Julio y Agosto.

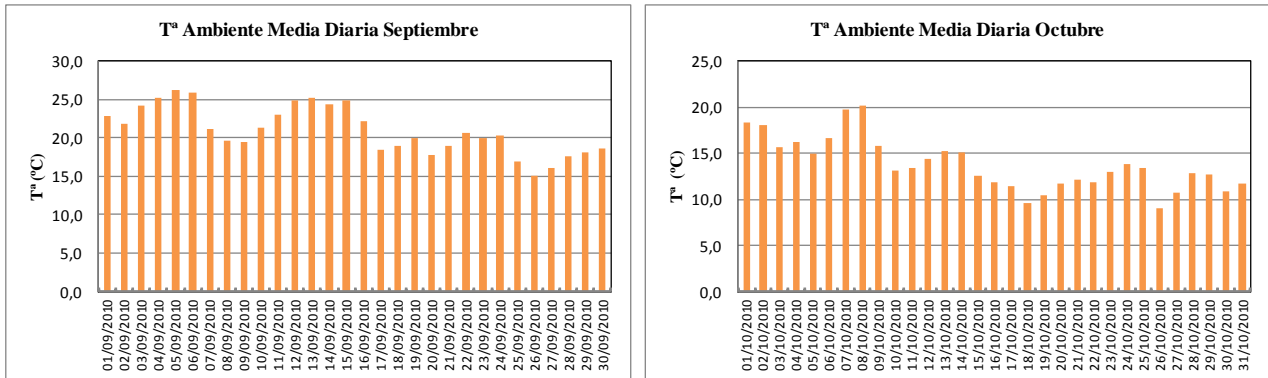


Ilustración 10 Valores diarios de Temperatura Ambiente Media Diaria (°C). Meses de Septiembre y Octubre.

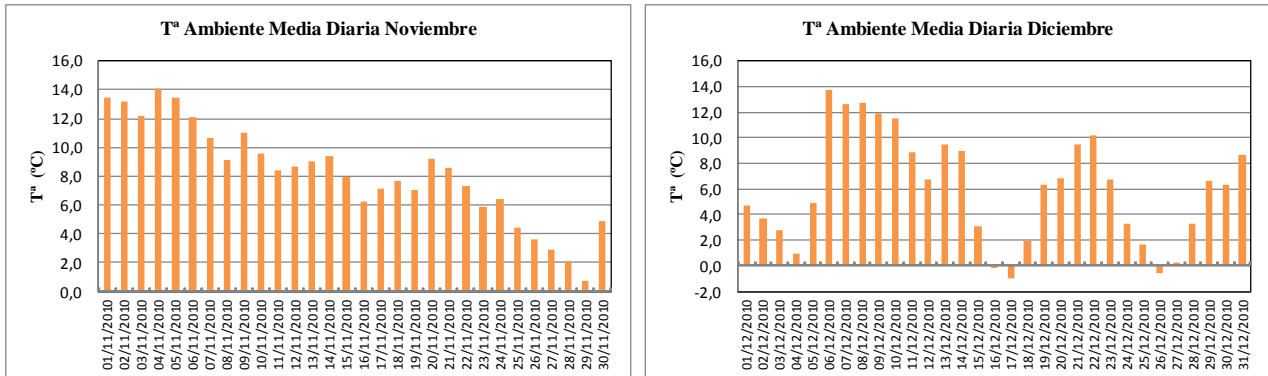


Ilustración 11 Valores diarios de Temperatura Ambiente Media Diaria (°C). Meses de Noviembre y Diciembre.

2.1.3. Cálculo de la Temperatura Ambiente Media Mensual.

Conociendo la temperatura ambiente media diaria podemos obtener los valores mensuales de “**Temperatura Ambiente Media Mensual**” y que se define como el promedio de las temperaturas ambientales medias diarias.

$$T_{mes_i} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{mes_i}} T_j}{N_{mes_i}} \quad \forall i = 1 \dots 12$$



Dónde $N_{mes,i}$ es el número de días del mes en cuestión. Se presentan los resultados en la siguiente gráfica:

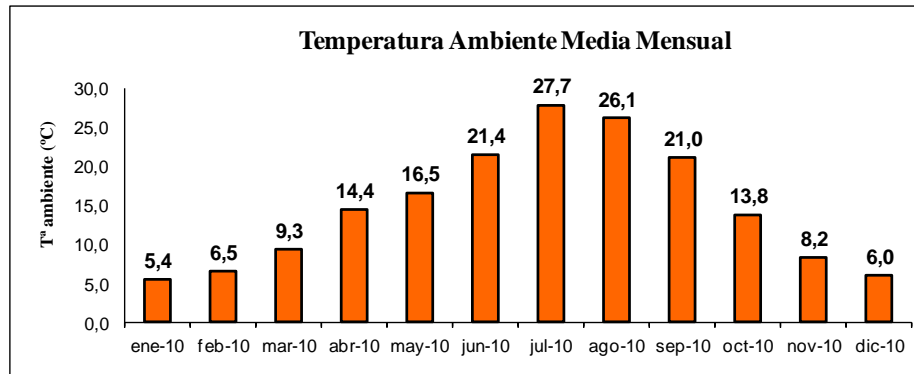


Ilustración 12 Valores mensuales real de la Temperatura Ambiente Media Mensual (°C).

Estos valores se asemejan a los valores estimados que aparecen en el Código Técnico de Edificación que también se podrían haber utilizado para el estudio. Podemos ver como los valores son similares en la siguiente gráfica:

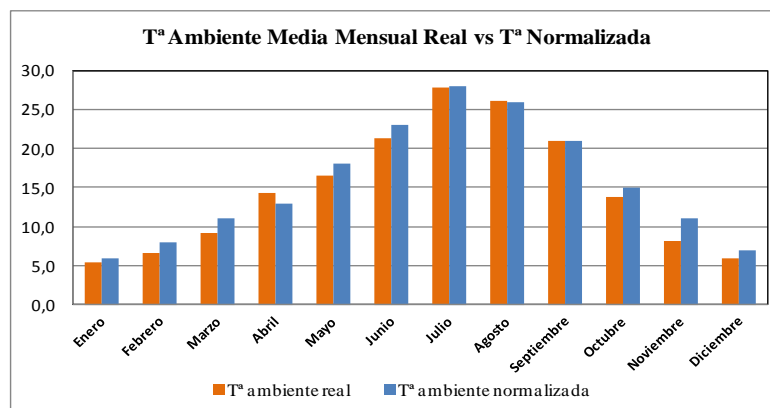


Ilustración 13 Comparación entre los valores reales y los valores normalizados de la Temperatura Ambiente Mensual.

Por esta razón **consideramos que el año utilizado en este estudio puede representar un año típico de la climatología de Madrid**, y por eso realizamos el estudio con estos valores reales.

2.2. DATOS DE RADIACIÓN SOLAR.

2.2.1. Datos Iniciales: Evolución de la Radiación Solar.

Al igual que con la temperatura, partimos de una muestra de datos de radiación solar tomados cada 10 minutos durante el año. Se tienen datos tanto de la radiación solar incidente sobre el plano horizontal, como de la radiación solar sobre un plano inclinado.



Los datos sobre superficie inclinada son medidos para un **plano inclinado de 40° sobre la horizontal**, y serán los valores que utilizaremos para los dos tipos de paneles solares estudiados en el proyecto, tanto los colectores solares térmicos planos como los termodinámicos.

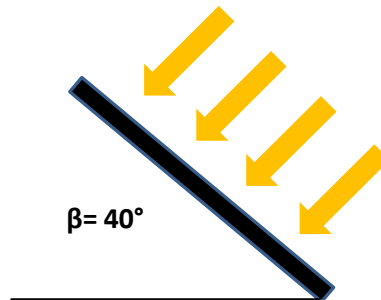


Ilustración 14 Radiación solar sobre un plano inclinado.

A continuación se muestran gráficamente los datos de **Radiación Solar sobre plano inclinado de 40°**, medidos en W/m^2 , obtenidos de la estación meteorológica para cada día y mes del año, y recopilados de forma trimestral:

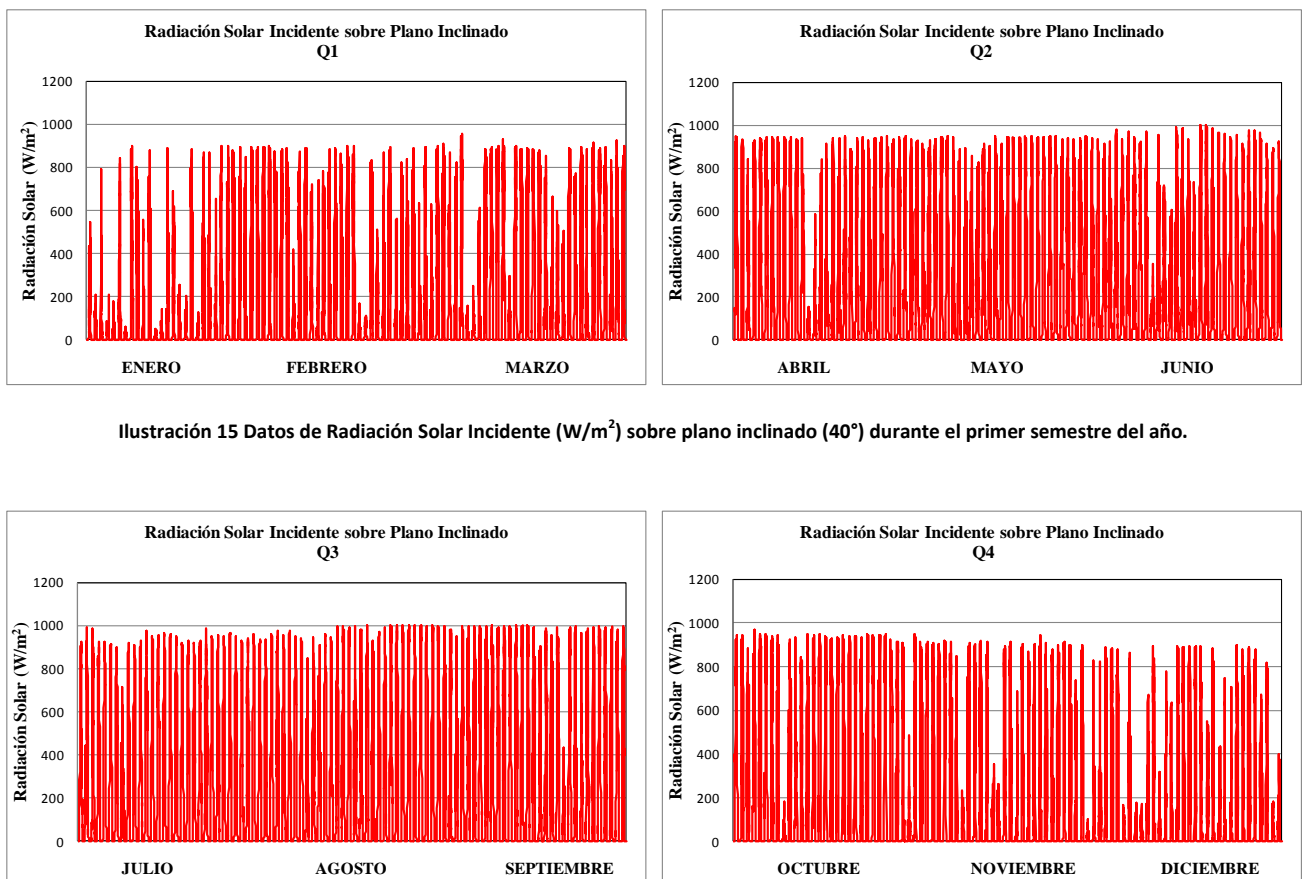


Ilustración 16 Datos de Radiación Solar Incidente (W/m^2) sobre un plano inclinado (40°) durante el segundo semestre del año.



En las gráficas se puede ver la variación en la intensidad de la radiación solar incidente, siendo mayor en los meses centrales del año que en los extremos, llegando a **máximos de radiación en torno a los 1000 W/m²**.

Del mismo modo que con la temperatura ambiente, uno de los **métodos seguidos es concentrar la evolución de todos los días de un mes en un único día medio representativo**. Obtenemos la *evolución media de la radiación solar sobre plano inclinado en un día medio representativo de todo el mes y que concentra todos los días de éste*.

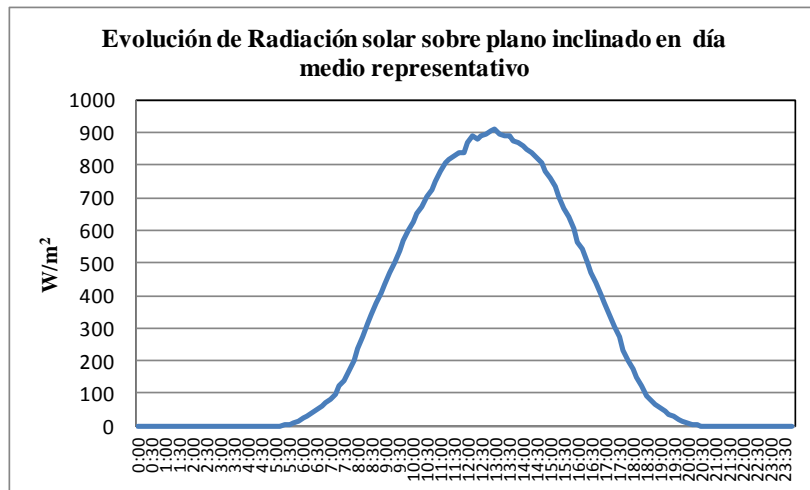


Ilustración 17 Evolución Media de Radiación Solar Incidente sobre plano inclinado (W/m²) durante un día medio representativo. Se representa el día medio representativo del mes de Julio, y que concentra una media de todos los días del mes.

2.2.2. Cálculo de la Radiación Incidente Media Diaria sobre plano inclinado.

También representaremos valores medios para cada día Partiendo de los datos iniciales de radiación incidente sobre plano inclinado, promediamos para obtener los valores de “**Radiación Incidente Media Diaria**”.

$$I_{dia_i} = \frac{\sum_{j=1}^{144} I_j}{144} \quad \forall i = 1 \dots 365$$

Se muestran gráficamente los valores obtenidos para cada día del año:

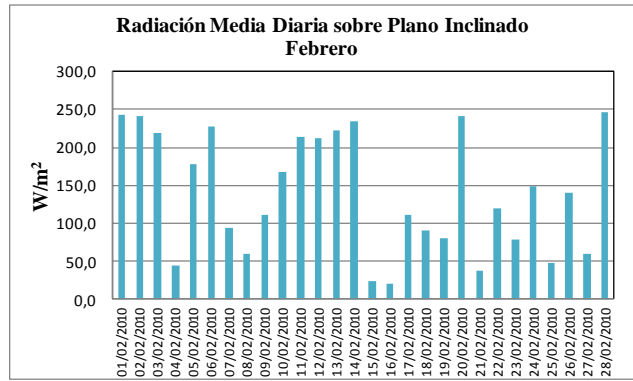
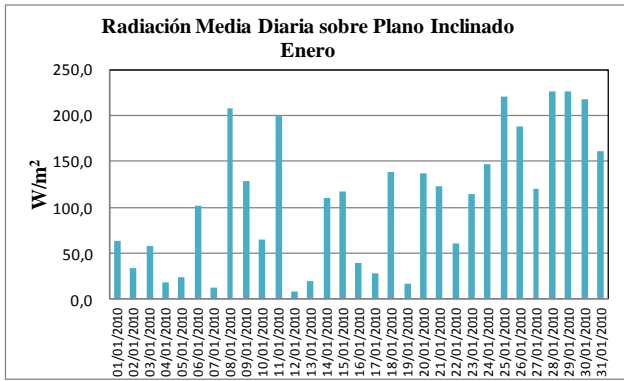


Ilustración 18 Radiación Incidente Media Diaria sobre plano inclinado. Meses de Enero y Febrero.

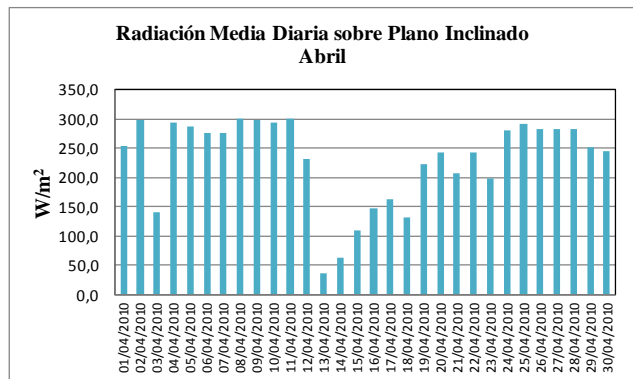
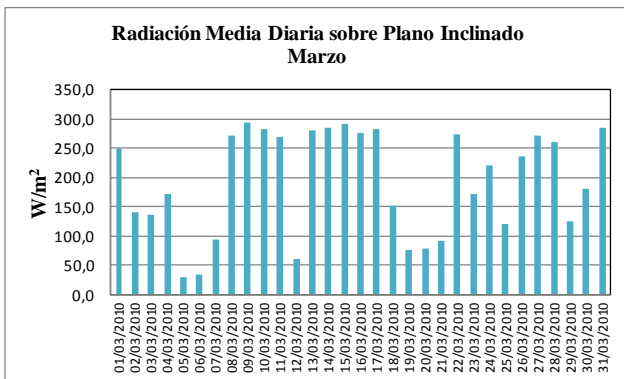


Ilustración 19 Radiación Incidente Media Diaria sobre plano inclinado. Meses de Marzo y Abril.

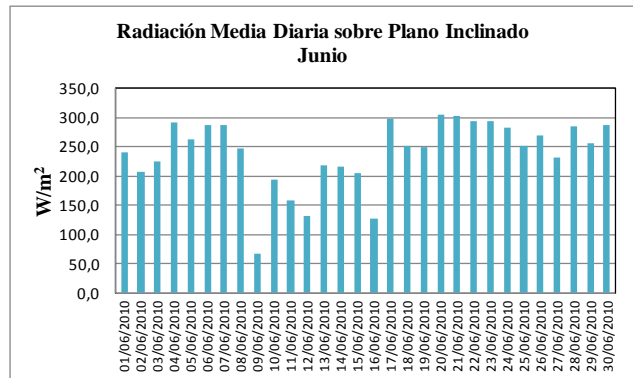
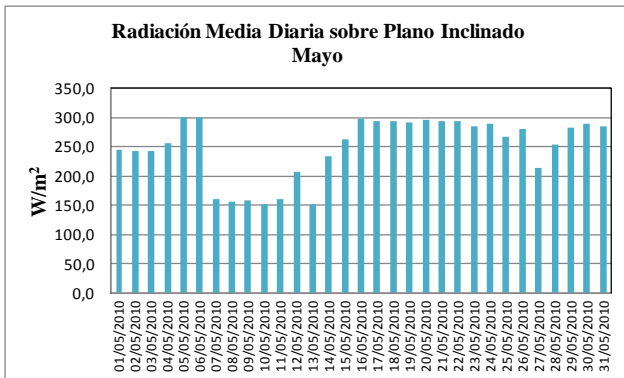


Ilustración 20 Radiación Incidente Media Diaria sobre plano inclinado. Meses de Mayo y Junio.

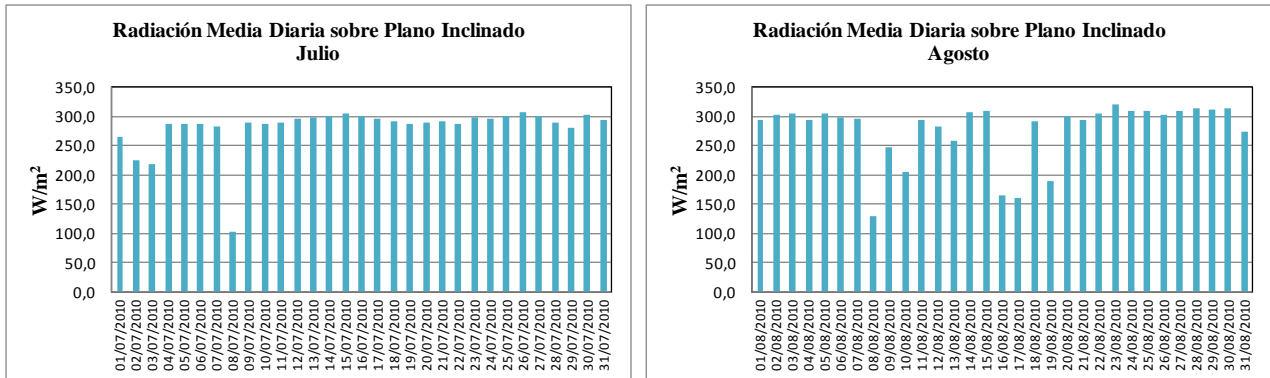


Ilustración 21 Radiación Incidente Media Diaria sobre plano inclinado. Meses de Julio y Agosto.

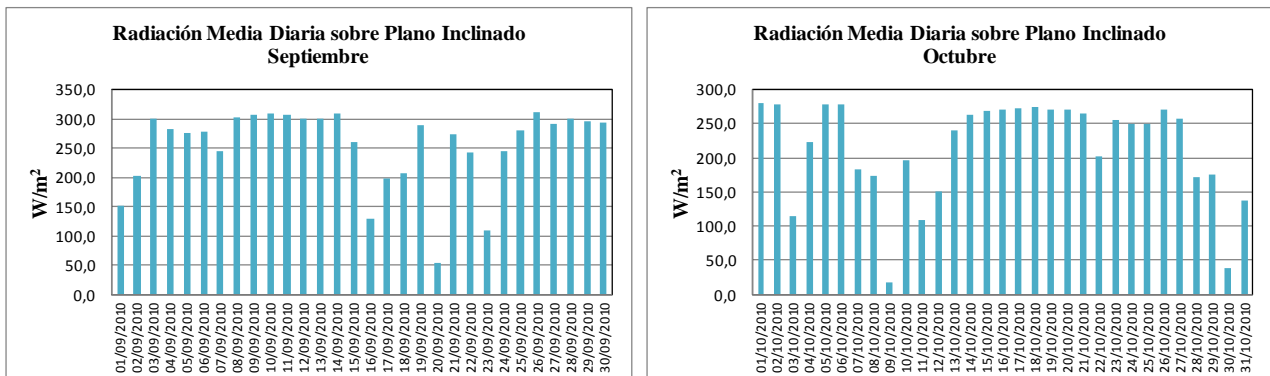


Ilustración 22 Radiación Incidente Media Diaria sobre plano inclinado. Meses de Septiembre y Octubre.

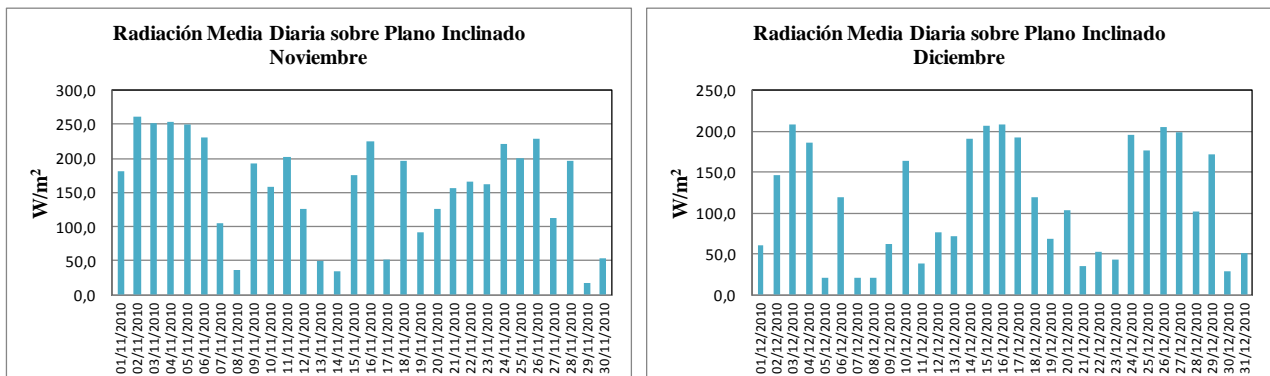


Ilustración 23 Radiación Incidente Media Diaria sobre plano inclinado. Meses de Noviembre y Diciembre.

Se pueden diferenciar dos comportamientos, durante los meses centrales y los meses extremos del año. En los meses extremos del año, se observa un comportamiento irregular de la radiación, caracterizado por valores predominantes de baja radiación alternados con días de alta intensidad. En cambio, los meses centrales del año se caracterizan por unos valores más regulares y de mayor intensidad que en el resto del año.



2.2.3. Cálculo de la Radiación Diaria Media Mensual sobre plano inclinado.

Conociendo la radiación incidente diaria media, podemos obtener un valor de radiación diaria media mensual característica para cada mes, que nos diga por término medio el valor de radiación en un día del mes.

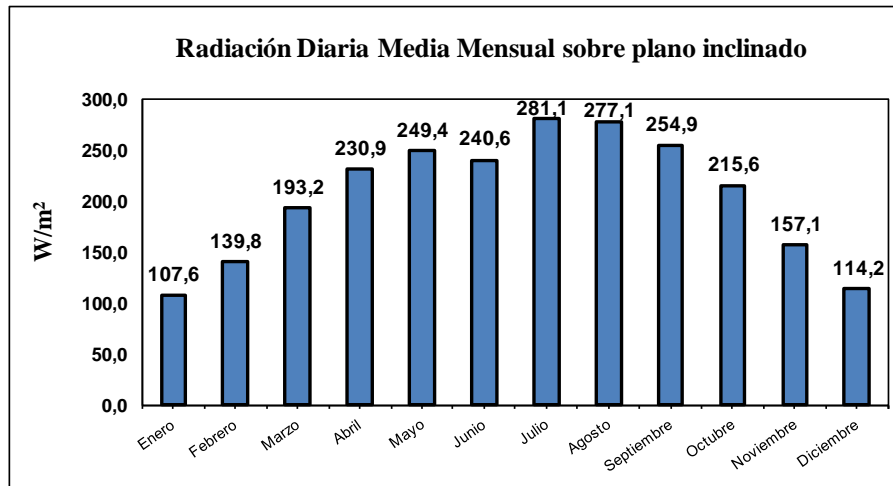


Ilustración 24 Valores de Radiación Diaria Media Mensual sobre un plano inclinado de 40°.

Al igual que con la temperatura ambiente, los valores reales de radiación solar incidente sobre plano inclinado se asemejan a valores genéricos utilizados en muchos estudios y proporcionados por sitios especializados como, en nuestro caso, la empresa “Censolar”:

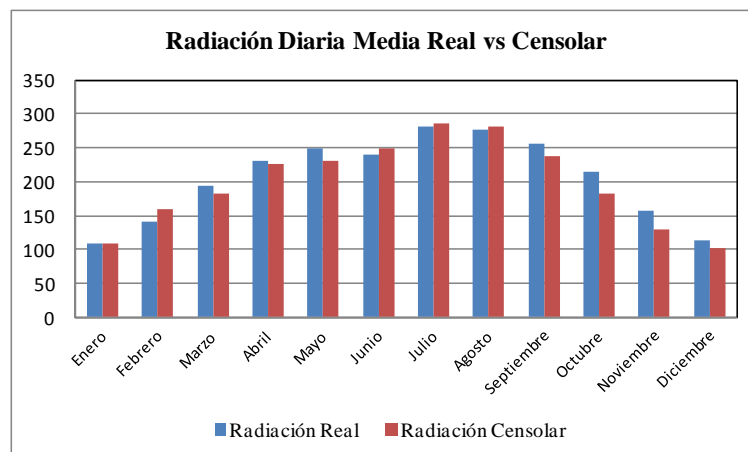


Ilustración 25 Comparación entre valores reales y los valores genéricos de Censolar de la Radiación Diaria Media sobre plano inclinado (40°).

Por esta razón el **año 2010** utilizado en este estudio **puede considerarse como un año típico de la climatología de Madrid**, y llevamos a cabo el estudio con estos valores reales.



3. CÁLCULO DE LA DEMANDA ENERGÉTICA.

3.1. INTRODUCCIÓN AL CÁLCULO DE LA DEMANDA ENERGÉTICA.

Según el **Código Técnico de Edificación (CTE)**, en su apartado de **Ahorro Energético**, la **demanda energética** se define como “*la energía necesaria para mantener en el interior del edificio unas condiciones de confort definidas reglamentariamente en función del uso del edificio y de la zona climática en la que se ubique*”. Se compone de la demanda energética de calefacción, de refrigeración y de aplicaciones para obtener agua caliente sanitaria.

En este proyecto, vamos a obtener la **demanda energética de agua caliente sanitaria**, es decir, la energía necesaria para satisfacer unas mínimas exigencias en cuanto a las necesidades de agua caliente sanitaria de la vivienda.

La expresión para obtener la **demanda energética o carga calorífica mensual para el calentamiento de agua caliente sanitaria (ACS)** viene dada por:

$$D_{ACS} = C_{ACS} \cdot N \cdot \rho_a \cdot c_{pa} \cdot (T_{sum} - T_{red})$$

Dónde:

- D_{ACS} es la demanda energética mensual (MJ).
- C_{ACS} es el consumo de ACS diario en una vivienda (litros/día).
- N es el número de días del mes (días).
- ρ_a es la densidad del agua (1 kg /litro).
- c_{pa} es el calor específico del agua (4187 J/kg·°C según el Pliego de Condiciones Técnicas).
- T_{sum} es la temperatura del agua caliente de acumulación o de suministro (°C).
- T_{red} es la temperatura del agua fría o agua de red (°C).



3.2. CÁLCULO DEL CONSUMO DE AGUA CALIENTE SANITARIA.

Vamos a proceder al cálculo de las necesidades diarias medias de agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar según el Código Técnico de Edificación (CTE), en su apartado de Ahorro Energético HE4.

Es necesario definir unos parámetros iniciales:

- Tipo de Vivienda: definirá los litros de ACS por persona diarios necesarios. Escogeremos una **Vivienda Unifamiliar**.
- Ocupación de la vivienda: supondremos **4 personas por vivienda**.
- Temperatura de Suministro: determinante para el cálculo de la demanda energética. Vamos a trabajar con una **Temperatura de Suministro de 50°C**.

La siguiente tabla nos muestra la demanda de referencia a una temperatura de suministro de 60°C, en litros/día, para cada tipo de vivienda:

Demanda de referencia a 60°C		
Criterio de demanda	Litros ACS/día a 60° C	
Viviendas unifamiliares	30	por persona
Viviendas multifamiliares	22	por persona
Hospitales y clínicas	55	por cama
Hotel ****	70	por cama
Hotel ***	55	por cama
Hotel/Hostal **	40	por cama
Camping	40	por emplazamiento
Hostal/Pensión *	35	por cama
Residencia (ancianos, estudiantes, etc)	55	por cama
Vestuarios/Duchas colectivas	15	por servicio
Escuelas	3	por alumno
Cuarteles	20	por persona
Fábricas y talleres	15	por persona
Administrativos	3	por persona
Gimnasios	20 a 25	por usuario
Lavanderías	3 a 5	por kilo de ropa
Restaurantes	5 a 10	por comida
Cafeterías	1	por almuerzo

Ilustración 26 Demanda de Referencia (l/día) a la temperatura de suministro de 60°C. Tabla obtenida del Código Técnico de Edificación, apartado de Ahorro Energético HE4.

Escogiendo una **vivienda unifamiliar**, y apoyándonos en la tabla del Código Técnico de Edificación podemos determinar que el consumo apropiado debe ser de **30 litros de ACS por persona y día a una temperatura de suministro de referencia de 60°C**.

Según esto, establecemos la siguiente expresión para el **consumo diario de agua caliente sanitaria por persona a la temperatura de suministro de 60°C**:

$$c(60^{\circ}\text{C}) = 30 \text{ l de ACS} / \text{persona} \cdot \text{dia}$$

El **consumo diario de ACS a 60°C por vivienda**, lo obtendremos del producto del consumo por persona y la ocupación de la vivienda:



$$C(60^{\circ}C) = c(60^{\circ}C) \cdot Ocupación$$

Siendo,

- $c(60^{\circ}C)$ el consumo de agua caliente sanitaria en litros por persona y día.
- $Ocupación$ el número de personas por vivienda.
- $C(60^{\circ}C)$ el consumo de agua caliente sanitaria en litros por vivienda y día.

De este modo:

$$C(60^{\circ}C) = 30 \text{ l de ACS} / \text{persona} \cdot \text{dia} \cdot 4 \text{ personas} / \text{vivienda}$$

$$C(60^{\circ}C) = 120 \text{ l ACS} / \text{vivienda} \cdot \text{dia}$$

Vamos a trabajar considerando una única vivienda, por lo que en adelante todos los cálculos serán para una sola vivienda, de modo que no incluiremos esta especificación en las unidades.

De este modo, el **consumo diario de ACS a 60°C por vivienda** es de:

$$C(60^{\circ}C) = 120 \text{ l ACS} / \text{dia}$$

Hay que tener en cuenta que vamos a trabajar con una temperatura de suministro de 50°C, no de 60°C, por lo que es necesario ajustar el cálculo anterior a nuestras necesidades reales.

El Código Técnico de Edificación establece, que para el caso en el que se elija una temperatura en el acumulador final diferente de 60°C, la demanda a considerar a efectos de cálculo, según la temperatura elegida, será la que se obtenga a partir de la siguiente expresión:

$$D(T) = \sum_{i=1}^{12} D_i(T)$$

$$D_i(T) = D_i(60^{\circ}C) \cdot \left(\frac{60 - T_i}{T - T_i} \right)$$

Siendo,

- $D(T)$: Demanda de Agua Caliente Sanitaria anual a la temperatura T elegida;
- $D_i(T)$: Demanda de Agua Caliente Sanitaria para el mes “i” a la temperatura T elegida;
- $D_i(60^{\circ}C)$: Demanda de Agua Caliente Sanitaria para el mes “i” a la temperatura de 60°C;
- T : Temperatura del acumulador final;
- T_i : Temperatura media del agua fría en el mes “i” o Temperatura de red.



Vamos a aplicar esta ecuación, para obtener el consumo diario de ACS a la temperatura de 50°C, utilizando la siguiente nomenclatura:

$$C(T) = \sum_1^{12} C_i(T)$$

$$C_i(T) = C_i(60^\circ\text{C}) \cdot \left(\frac{60 - T_{red_i}}{T_{ac} - T_{red_i}} \right)$$

Suponemos que el consumo diario de ACS es el mismo para cada día del mes, por lo que deberíamos de hablar de un “**consumo medio diario de ACS**” representativo para cada día del mes.

Según hemos calculado antes, el consumo medio diario de ACS a 60°C será constante para todo el año, y de valor:

$$C_i(60^\circ\text{C}) = 120 \text{ l ACS/día} \quad \text{con } i = \text{Enero ... Diciembre}$$

También debemos suponer que la temperatura mínima del agua de red es la misma para cada día del mes, tomando así un valor medio, que llamaremos “**temperatura mínima media del agua de red o temperatura media de red**”.

La evolución mensual de esta temperatura media de red, la podemos obtener del “*Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura (IDEA)*” que toma como fuente los datos de la empresa Censolar. A continuación, se muestran los valores utilizados tomados para la Comunidad de Madrid:

		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	AÑO
28	LÉRIDA	5	6	8	10	11	12	13	12	11	10	8	5	9,3
29	LUGO	6	7	9	11	12	13	14	13	12	11	9	6	10,3
30	MADRID	6	7	9	11	12	13	14	13	12	11	9	6	10,3
31	MÁLAGA	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8	12,3

Ilustración 27. Temperatura mínima media del agua de la red general (°C), Madrid. Fuente: “Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura” (Tabla 4, CENSOLAR).

A su vez, la **Temperatura media de suministro o temperatura del acumulador final**, es de 50°C.

Con todos estos datos, podemos obtener el “**Consumo Medio Diario de ACS**” a la temperatura de suministro de 50°C, para una vivienda unifamiliar de 4 personas:



	C _{ACS} (60°C) (l/día)	T _{red} (°C)	T _{sum} (°C)	C _{ACS} (50°C) (l/día)
Enero	120	6	50	147,3
Febrero		7		147,9
Marzo		9		149,3
Abril		11		150,8
Mayo		12		151,6
Junio		13		152,4
Julio		14		153,3
Agosto		13		152,4
Septiembre		12		151,6
Octubre		11		150,8
Noviembre		9		149,3
Diciembre		6		147,3

Ilustración 28 Valores del Consumo Diario Medio Mensual de ACS a T^a suministro (50°C).

3.3. CÁLCULO DE LA DEMANDA ENERGÉTICA MENSUAL.

La **demanda energética o carga calorífica de calentamiento**, es la cantidad de calor necesaria para calentar el agua destinada al consumo doméstico.

El cálculo de la demanda energética puede realizarse a través de la siguiente expresión:

$$D_{ACS} = C_{acs} \cdot \rho_a \cdot c_{pa} \cdot (T_{consumo} - T_{red})$$

Como en nuestro caso tomamos una temperatura de consumo de 50°C, el consumo de agua caliente sanitaria debe ser la que hemos calculado a esa temperatura. Además, necesitamos completar la expresión con el número de días mensuales.

De esta forma, la expresión que seguimos para el cálculo de la **demanda energética mensual** es la ya definida en el apartado introductorio del cálculo de demanda energética, y viene dada por:

$$D_{ACS_Mensual} (MJ) = C_{acs}(50^\circ C) \cdot N_{dias} \cdot \rho_a \cdot c_{pa} \cdot (T_{consumo} - T_{red})$$

Donde,

- D_{ACS} es la demanda energética mensual (MJ);
- C_{acs} (50°C) es el consumo medio diario de ACS a la temperatura de suministro de 50°C y para una vivienda unifamiliar (litros/día);
- N_{días} es el número de días del mes (días);



- ρ_a es la densidad del agua (1 kg/litro);
- C_{pa} es el calor específico del agua (4187 J/ kg·°C);
- T_{sum} es la temperatura del agua caliente de acumulación o suministro (50°C);
- T_{red} es la temperatura del agua fría o agua de red (°C).

Las propiedades del agua son consideradas constantes para el cálculo, durante todos los meses del año. Son las siguientes:

- Densidad del Agua: $\rho_a = 1 \text{ kg/litro}$
- Calor específico del Agua: $c_{pa} = 4187 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

Con todo esto, se pueden calcular los valores de **Demanda Energética Mensual a la temperatura de suministro de 50°C:**

	C_{ACS} Diario (50°C) (l/día)	N_{días} (días)	ρ_a (kg/l)	c_{pa} (J/kg·°C)	T_{sum} (°C)	T_{red} (°C)	D_{ACS} Mensual (50°C) (MJ)
Enero	147,3	31	1	4187	50	6	841,1
Febrero	147,9	28				7	745,6
Marzo	149,3	31				9	794,4
Abril	150,8	30				11	738,6
Mayo	151,6	31				12	747,6
Junio	152,4	30				13	708,4
Julio	153,3	31				14	716,5
Agosto	152,4	31				13	732,1
Septiembre	151,6	30				12	723,5
Octubre	150,8	31				11	763,2
Noviembre	149,3	30				9	768,7
Diciembre	147,3	31				6	841,1

Ilustración 29 Valores de la Demanda Energética Mensual a la temperatura de suministro de 50°C.

Podemos representar gráficamente los resultados, para ver la comparación entre los valores mensuales de demanda energética:

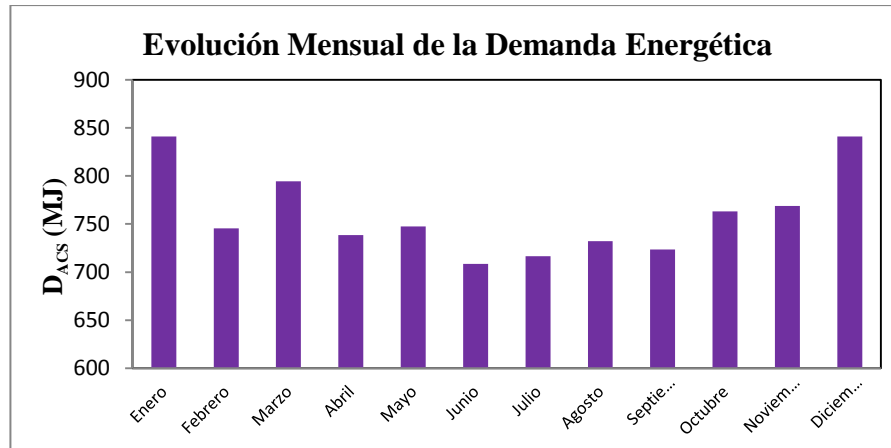


Ilustración 30 Representación Gráfica de la Demanda Energética Mensual a una temperatura de suministro de 50°C.

Se puede ver como en los meses centrales del año, debido a que las temperaturas son más altas, la temperatura del agua fría de red también es mayor y por ello las necesidades energéticas para calentar el agua fría hasta la temperatura de suministro son menores que en los meses de más frío. Es decir el escalonamiento mensual que hay en el incremento de temperatura ($T_{\text{sum}} - T_{\text{red}}$) provoca un escalonamiento en la demanda energética mensual.

3.4. CÁLCULO DE LA DEMANDA ENERGÉTICA MEDIA DIARIA.

Atendiendo al comportamiento real, la evolución de la demanda diaria a lo largo del año presenta fuertes oscilaciones. Entre los factores que influyen en estas oscilaciones se encuentran la temperatura ambiente y el efecto que tiene el calendario sobre la actividad laboral.

La evolución de la demanda diaria sigue un ciclo semanal, marcado por el nivel de actividad productiva en cada día de la semana.

La semana normal tiene un periodo de martes a viernes como días de máxima demanda y toma valores más bajos los sábados y los domingos. A pesar de ser laborables, los lunes tienen un menor consumo, pues la industria tarda en poner en marcha todo el proceso productivo tras el descanso dominical. Como normal general, en los domingos el consumo es un 25% menor que en un día laborable medio.

La distribución más cercana posible a la realidad de la demanda diaria a lo largo de una semana cualquiera, podría asemejarse a lo mostrado en la siguiente gráfica:

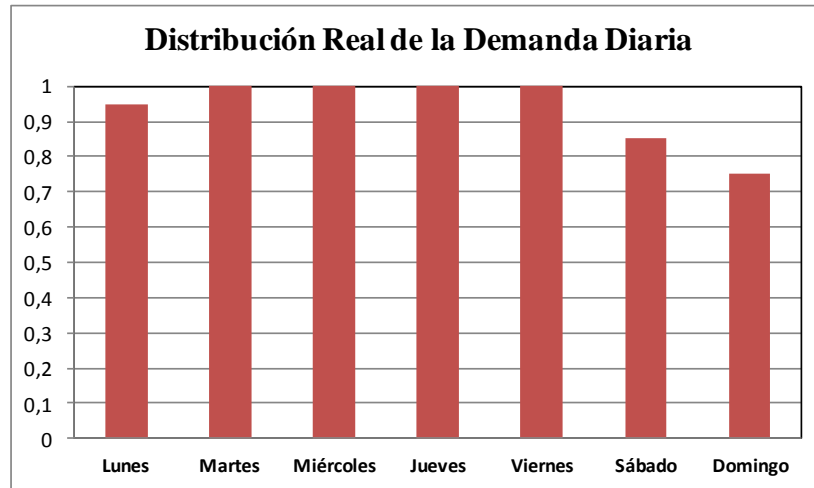


Ilustración 31 Evolución Real de la Demanda Energética Diaria. Información basada en los estudios desarrollados por el Ministerio de Industria y Energía y plasmados en el “Atlas de Demanda Eléctrica del Proyecto INDEL”.

Esta información, basada en los estudios llevados a cabo por el Ministerio de Industria y Energía en el “*Atlas de Demanda Eléctrica*”, tiene en cuenta factores estacionales como la actividad laboral, para establecer un patrón de comportamiento que se repite de forma semanal.

En este proyecto, no vamos a considerar este comportamiento, simplificando así los cálculos realizados. Vamos a *suponer que la demanda energética se reparte por igual en cada día de la semana*, ya sea un día laborable, dominical o festivo, dando lugar a una **demanda energética diaria semanal uniforme**.

Es decir, la demanda energética mensual para el calentamiento de agua caliente sanitaria se va a repartir por igual en cada uno de los días del mes.

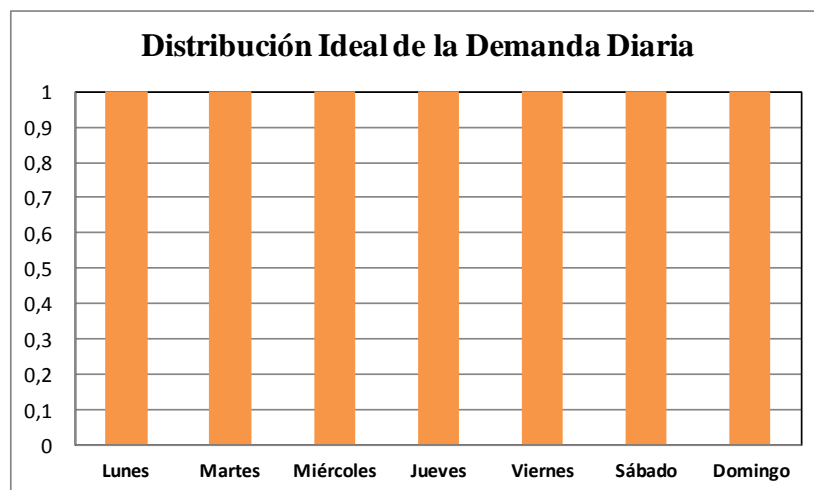


Ilustración 32 Distribución Ideal de la Demanda Energética Diaria. Para este estudio, se considera despreciable el efecto semanal estacional, de modo que la demanda diaria es uniforme durante un mismo mes.

De esta manera, partiendo de los valores de demanda energética mensual, podemos obtener unos valores de **Demanda Energética Media Diaria** mediante la expresión:



$$D_{ACS\ Diaria} = \frac{D_{ACS\ Mensual}}{N_{días}}$$

	D _{ACS} Mensual (50°C) (MJ)	N _{días} (días)	D _{ACS} Diaria (50°C) (MJ)
Enero	841,1	31	27,1
Febrero	745,6	28	26,6
Marzo	794,4	31	25,6
Abril	738,6	30	24,6
Mayo	747,6	31	24,1
Junio	708,4	30	23,6
Julio	716,5	31	23,1
Agosto	732,1	31	23,6
Septiembre	723,5	30	24,1
Octubre	763,2	31	24,6
Noviembre	768,7	30	25,6
Diciembre	841,1	31	27,1

Ilustración 33 Valores de Demanda Energética Mensual y Demanda Energética Media Diaria a 50°C.

Podemos representar la **distribución diaria de la demanda energética** a lo largo de los 365 días del año y así ver su comportamiento diario:

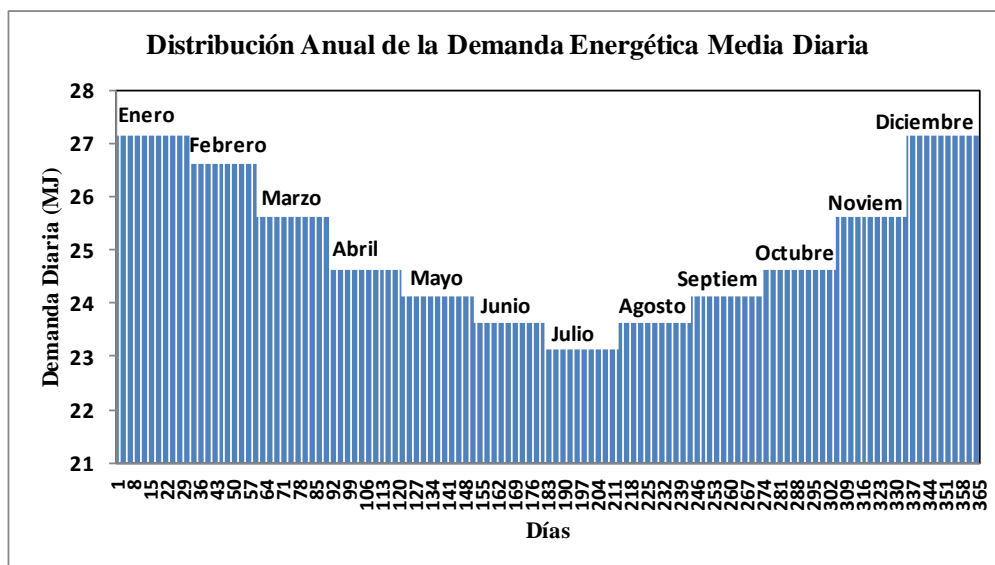


Ilustración 34 Distribución Anual de la Demanda Energética Media Diaria durante los 365 días del año.

Viendo esta distribución, podemos concluir que:

- No se tiene en cuenta la **estacionalidad diaria** dentro de cada mes. De este modo, en un mismo mes, la demanda energética diaria es uniforme.
- Sí se tiene en cuenta la **estacionalidad mensual**, y viene reflejada en los cálculos realizados anteriormente de la demanda energética mensual.



Al igual que pasara con la demanda energética mensual, el escalonamiento mensual que hay en el incremento de temperatura ($T_{\text{sum}} - T_{\text{red}}$) provoca un escalonamiento en la demanda energética mensual, de ahí la forma de la gráfica y que en los meses centrales la demanda energética media diaria sea menor.

3.5. CÁLCULO DE LA EVOLUCIÓN DE DEMANDA ENERGÉTICA A LO LARGO DEL DÍA.

Basándonos en la información contenida en el “*Atlas de Demanda Eléctrica*”, se puede concluir que el perfil horario de demanda muestra fuertes oscilaciones, dos o tres puntas durante el día y un profundo valle en la noche.

Vamos a representar los valores de la demanda energética horaria, considerando **tres picos de consumo de agua caliente sanitaria durante el día**, de modo que el consumo se concentre en estos tres periodos.

Durante un día cualquiera, el consumo de agua caliente sanitaria C_{acs} , se repartirá en los siguientes periodos:

- **De 8:00 a 9:00:** se consumirá un 55% del consumo total diario.
- **De 14:00 a 15:00:** se consumirá un 15% del consumo total diario.
- **De 21:00 a 22:00:** se consumirá un 30% del consumo total diario.

Así, partiendo del **consumo medio diario de ACS a la temperatura de suministro de 50°C**, podemos obtener el consumo en cada uno de los tres periodos para un día cualquiera del año:

	Cacs Total a 50°C (litros/día)	Cacs 8:00-9:00 (l/periodo 1 h)	Cacs 14:00-15:00 (l/periodo 1 h)	Cacs 21:00-22:00 (l/periodo 1 h)
	100%	55%	15%	30%
Enero	147,27	81,00	22,09	44,18
Febrero	147,91	81,35	22,19	44,37
Marzo	149,27	82,10	22,39	44,78
Abril	150,77	82,92	22,62	45,23
Mayo	151,58	83,37	22,74	45,47
Junio	152,43	83,84	22,86	45,73
Julio	153,33	84,33	23,00	46,00
Agosto	152,43	83,84	22,86	45,73
Septiembre	151,58	83,37	22,74	45,47
Octubre	150,77	82,92	22,62	45,23
Noviembre	149,27	82,10	22,39	44,78
Diciembre	147,27	81,00	22,09	44,18

Ilustración 35 Distribución horaria del consumo de agua caliente sanitaria. El consumo de agua en un día, se reparte en tres periodos, de una hora de duración cada uno.



Una vez hemos obtenido los valores de consumo de agua caliente, podemos obtener el equivalente en carga calorífica, es decir cómo se distribuye la demanda energética en cada periodo de una hora.

Tenemos que volver a recurrir a la expresión de demanda energética, utilizada con anterioridad:

$$D_{ACS_Mensual}(MJ) = C_{acs}(50^{\circ}C) \cdot N_{dias} \cdot \rho_a \cdot c_{pa} \cdot (T_{consumo} - T_{red})$$

En este caso, al obtener los valores de demanda energética en cada periodo de una hora, podemos modificar la ecuación y utilizar la siguiente, acorde a las unidades utilizadas, para definir una **Demanda Energética Media Horaria**:

$$D_{ACS_Horaria}(MJ) = C_{50^{\circ}C}(l/1h) \cdot \rho_a \cdot c_{pa} \cdot (T_{consumo} - T_{red})$$

Vamos a realizar estos cálculos para cada uno de los tres periodos, para verlo con claridad. Los resultados se presentan en las siguientes tablas:

PERIODO 8:00-9:00	C _{ACS} Horario 8:00-9:00 (l/periodo 1h)	ρ_a (kg/l)	c_{pa} (J/kg·°C)	$T_{sum} - T_{red}$ (°C)	D _{ACS} Horaria 50°C 8:00-9:00 (MJ)
Enero	81,00	1	4187	44	14,92
Febrero	81,35			43	14,65
Marzo	82,10			41	14,09
Abril	82,92			39	13,54
Mayo	83,37			38	13,26
Junio	83,84			37	12,99
Julio	84,33			36	12,71
Agosto	83,84			37	12,99
Septiembre	83,37			38	13,26
Octubre	82,92			39	13,54
Noviembre	82,10			41	14,09
Diciembre	81,00			44	14,92

Ilustración 36 Cálculo de los valores mensuales de Demanda Energética Media Horaria. Período 8:00-9:00.



PERIODO 14:00-15:00	C _{ACS} Horario 14:00-15:00 (l/periodo 1h)	ρ_a (kg/l)	c_{pa} (J/kg·°C)	$T_{sum} - T_{red}$ (°C)	D _{ACS} Horaria 50°C 14:00-15:00 (MJ)
Enero	22,09	1	4187	44	4,07
Febrero	22,19			43	3,99
Marzo	22,39			41	3,84
Abril	22,62			39	3,69
Mayo	22,74			38	3,62
Junio	22,86			37	3,54
Julio	23,00			36	3,47
Agosto	22,86			37	3,54
Septiembre	22,74			38	3,62
Octubre	22,62			39	3,69
Noviembre	22,39			41	3,84
Diciembre	22,09			44	4,07

Ilustración 37 Cálculo de los valores mensuales de Demanda Energética Media Horaria. Período 14:00-15:00.

PERIODO 21:00-22:00	C _{ACS} Horario 21:00-22:00 (l/periodo 1h)	ρ_a (kg/l)	c_{pa} (J/kg·°C)	$T_{sum} - T_{red}$ (°C)	D _{ACS} Horaria 50°C 21:00-22:00 (MJ)
Enero	44,18	1	4187	44	8,14
Febrero	44,37			43	7,99
Marzo	44,78			41	7,69
Abril	45,23			39	7,39
Mayo	45,47			38	7,24
Junio	45,73			37	7,08
Julio	46,00			36	6,93
Agosto	45,73			37	7,08
Septiembre	45,47			38	7,24
Octubre	45,23			39	7,39
Noviembre	44,78			41	7,69
Diciembre	44,18			44	8,14

Ilustración 38 Cálculo de los valores mensuales de Demanda Energética Media Horaria. Período 21:00-22:00.

En las siguientes tablas, se resumen los valores de consumo de agua caliente y de demanda energética media horaria en cada periodo de consumo. Los resultados son los siguientes:



	C _{ACS} Horario 50°C (l/h)			D _{ACS} Horaria 50°C (MJ)			D _{ACS} Diaria 50°C (MJ)
	8:00-9:00	14:00-15:00	21:00-22:00	8:00-9:00	14:00-15:00	21:00-22:00	
Enero	81,00	22,09	44,18	14,92	4,07	8,14	27,13
Febrero	81,35	22,19	44,37	14,65	3,99	7,99	26,63
Marzo	82,10	22,39	44,78	14,09	3,84	7,69	25,62
Abril	82,92	22,62	45,23	13,54	3,69	7,39	24,62
Mayo	83,37	22,74	45,47	13,26	3,62	7,24	24,12
Junio	83,84	22,86	45,73	12,99	3,54	7,08	23,61
Julio	84,33	23,00	46,00	12,71	3,47	6,93	23,11
Agosto	83,84	22,86	45,73	12,99	3,54	7,08	23,61
Septiembre	83,37	22,74	45,47	13,26	3,62	7,24	24,12
Octubre	82,92	22,62	45,23	13,54	3,69	7,39	24,62
Noviembre	82,10	22,39	44,78	14,09	3,84	7,69	25,62
Diciembre	81,00	22,09	44,18	14,92	4,07	8,14	27,13

Ilustración 39 Distribución horaria del Consumo de Agua Caliente Sanitaria y de la Demanda Energética Media Horaria en cada período de consumo.

Como cada período de consumo es de una hora y se supone un **caudal de agua caliente uniforme**, el consumo de agua caliente se repartirá en 6 períodos de diez minutos, al igual que lo hará la demanda energética media horaria:

$$D_{ACS\ 10min} = \frac{D_{ACS\ Horaria}}{6}$$

Siguiendo con la estructura descrita, **concentramos la evolución de todos los días de un mes en un único día medio representativo**, y obtenemos la **evolución media de la demanda energética en un día medio representativo y que concentra todos los días de cada mes**. En este caso al no tener en cuenta la estacionalidad diaria dentro de cada mes, la demanda energética diaria es uniforme, y todos los días coinciden con el día medio representativo.

Representamos la evolución media para el día medio representativo de Julio:

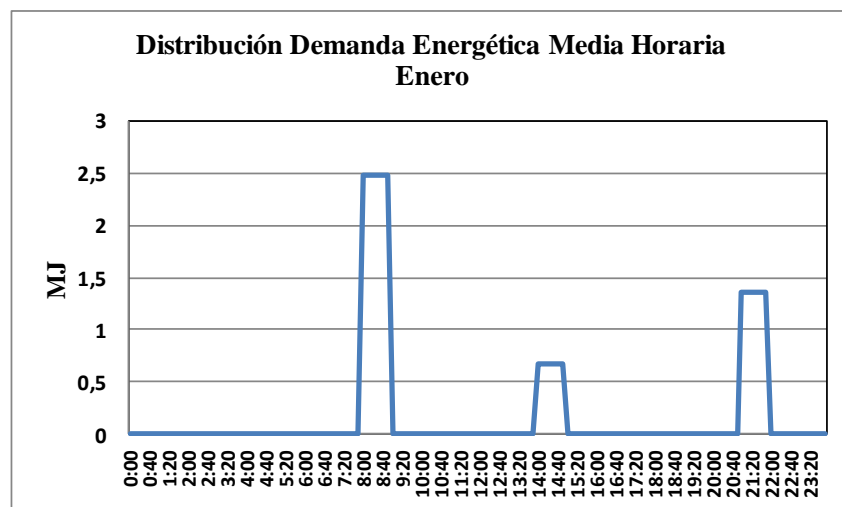


Ilustración 40 Evolución Media de Demanda Energética durante un día medio representativo. Se representa el día medio representativo del mes de Julio, y que concentra una media de todos los días del mes.



Cada día tenemos tres picos de demanda de agua caliente sanitaria, que conllevan tres picos de demanda energética o carga calorífica. De 8:00 a 9:00 se concentra más de la mitad del consumo, suponiendo que se necesita agua caliente para realizar tareas como la ducha. De 14:00 a 15:00 se tiene el menor consumo, con aplicaciones como el lavado de vajillas o de ropa, y por último, de 21:00 a 22:00 tenemos el consumo restante.

Vamos a representar cada uno de los tres picos por separado, y así poder ver sus valores:

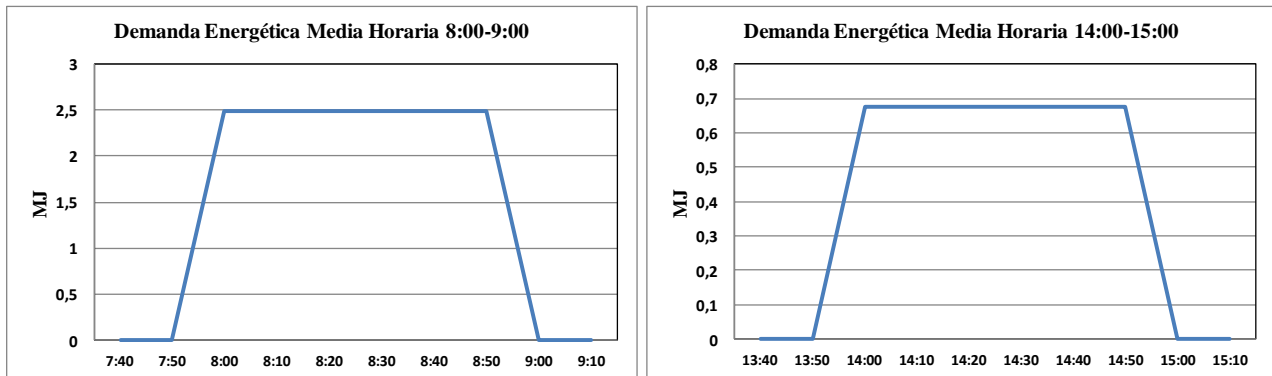


Ilustración 41 Evolución Media de Demanda Energética en un día medio representativo. Periodos 8:00-9:00 y 14:00-15:00.

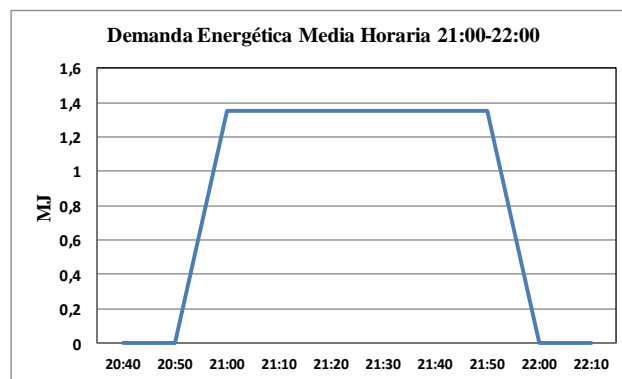


Ilustración 42 Evolución Media de Demanda Energética en un día medio representativo. Periodo 21:00-22:00.

Atendiendo a esta distribución, podemos concluir que:

- Se tiene en cuenta la **estacionalidad horaria** dentro de cada día. La demanda de agua y energética no se distribuyen por igual a lo largo del día, diferenciando tres picos de una hora cada uno, dónde se concentra con diferente intensidad la demanda.
- No se tiene en cuenta la **estacionalidad diaria** dentro de cada mes. De este modo, en un mismo mes, la demanda energética diaria es uniforme.
- Sí se tiene en cuenta la **estacionalidad mensual**, y viene reflejada en los cálculos realizados anteriormente de la demanda energética mensual. De este modo, la magnitud de cada pico de demanda será diferente en función del mes en el que nos encontremos.

4. PANELES SOLARES TERMODINÁMICOS.

4.1. INTRODUCCIÓN A LOS PANELES SOLARES TERMODINÁMICOS.

Conocer el funcionamiento de las instalaciones de agua caliente sanitaria con paneles solares termodinámicos, como comercialmente son conocidos, es el objetivo principal de este proyecto. Para ello, vamos a comenzar explicando sus principios fundamentales, las diferentes aplicaciones para las que se destinan y terminaremos realizando los cálculos oportunos para conocer la magnitud de su consumo energético.

4.1.1. Orígenes de la Termodinámica. Ciclo de Carnot.

El concepto de la Termodinámica fue dado a conocer por el ingeniero francés Nicolás Sadi Carnot, quién en 1824 publicaría su obra *“Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia”*, donde se exponían las ideas que darían forma al segundo principio de la termodinámica.

Junto a los estudios del físico y matemático alemán Rudolf Clausius se estableció el principio de Carnot-Clausius, que permite determinar el máximo rendimiento de una máquina térmica en función de las temperaturas de su fuente caliente y de su fuente fría. En un ciclo de Carnot se establece la relación entre las temperaturas del foco caliente y el frío y el rendimiento de una máquina térmica.

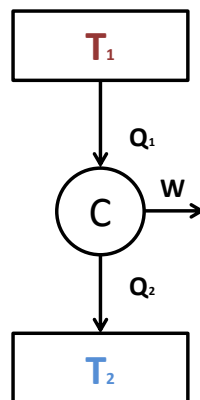


Ilustración 43 Esquema representativo del Ciclo de Carnot. $T_1 > T_2$

El ciclo de Carnot se produce cuando una máquina trabaja absorbiendo una cantidad de calor Q_1 de la fuente de alta temperatura (T_1) y cede un calor Q_2 a la de baja temperatura (T_2) produciendo un trabajo sobre el exterior.

El rendimiento en el ciclo viene definido como:



$$\eta = \frac{W_u}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Este rendimiento es mayor que el rendimiento de cualquier máquina que funcione cíclicamente entre las mismas fuentes de temperatura. Es decir, ninguna máquina real alcanza el rendimiento teórico de Carnot, ya que este es el máximo posible para este intervalo de temperaturas. Una máquina térmica que realiza este ciclo se llama máquina de Carnot.

Como todos los procesos que tienen lugar en el ciclo ideal son reversibles, el ciclo se puede invertir, de modo que la máquina absorba calor de la fuente fría y ceda calor a la fuente caliente, teniendo que suministrar trabajo a la máquina. Esto es conocido como ciclo inverso de Carnot, típico de las máquinas frigoríficas.

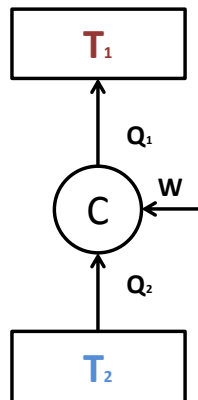


Ilustración 44 Ciclo Inverso Carnot. $T_1 > T_2$

La aplicación básica de una máquina frigorífica es transformar algún tipo de energía, habitualmente mecánica en energía térmica para obtener y mantener un recinto a una temperatura menor que la temperatura exterior. Esta energía mecánica se puede obtener previamente a partir de otro tipo de energía, como la energía eléctrica mediante un motor eléctrico.

Se hace circular un fluido frigorífico o refrigerante, que sufre transformaciones de presión, temperatura y fase (líquida o gaseosa) en distintas partes de la máquina, al ponerse en contacto con los recintos para absorber y transferir calor.

La máquina frigorífica se puede utilizar como calentador o bomba de calor. Lo único que hay que hacer es que el foco caliente sea la habitación y el foco frío el exterior.

El mejor ciclo de refrigeración es aquel que extrae la mayor cantidad de calor (Q_2) del foco frío (T_2) con el mejor trabajo (W). Para tener una medida capaz de medir esta relación, se define el **coeficiente de eficiencia energética y operación (COP)** de una máquina frigorífica como:

$$COP = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$



Para determinar la eficiencia o COP de la bomba de calor, hay que considerar que lo que nos interesa es que ceda la mayor cantidad de calor (Q_1) al foco caliente, por lo que la expresión vendría dada por:

$$COP = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2}$$

4.1.2. Origen de los Paneles Solares Termodinámicos.

Los sistemas con **paneles solares termodinámicos**, como comercialmente son conocidos, son una combinación de los colectores térmicos planos tradicionales y las bombas de calor.

La energía solar termodinámica basa su funcionamiento en el Ciclo de Carnot Inverso, según el cual aplicando un trabajo se consigue captar calor del foco frío para al foco caliente.

En este caso, se aplica un trabajo eléctrico al compresor que permite el movimiento del refrigerante. El refrigerante se encargará de recoger el calor que el panel termodinámico capta del ambiente, que actúa de foco frío, y lo lleva hasta el acumulador de agua, dónde se calienta el agua caliente sanitaria.

La patente mundial original de este tipo de tecnología es francesa, y utilizan el nombre comercial de “**paneles solares termodinámicos**”. Fue adquirida en 1974 por la empresa “Energie” de Portugal, y desde 1978 comparte la patente con la empresa española “Solar PST”.

Los paneles solares termodinámicos son aplicables a distintos procesos donde se requiera agua caliente. Los más comunes son:

- Agua Caliente Sanitaria.
- Calefacción de viviendas.
- Climatización de piscinas cubiertas y al aire libre.

4.1.3. Esquemas comerciales de Instalaciones de paneles solares termodinámicos según su aplicación.

Los paneles solares termodinámicos son utilizados para diferentes aplicaciones, como el suministro de agua caliente sanitaria, la calefacción de viviendas o las actividades de climatización de piscinas.

Las instalaciones, en función de su aplicación, constan de diferentes equipos, entre los que podemos destacar los siguientes:

- **Instalaciones para Agua Caliente Sanitaria:** vienen equipados con un Termoacumulador, un intercambiador de calor, un bloque termodinámico con el compresor y los paneles solares termodinámicos. Además incorpora un vaso de expansión, ya que el agua al

calentarse aumenta su volumen, y el vaso amortigua mediante un cuerpo elástico interno los excesos de presión en las tuberías.

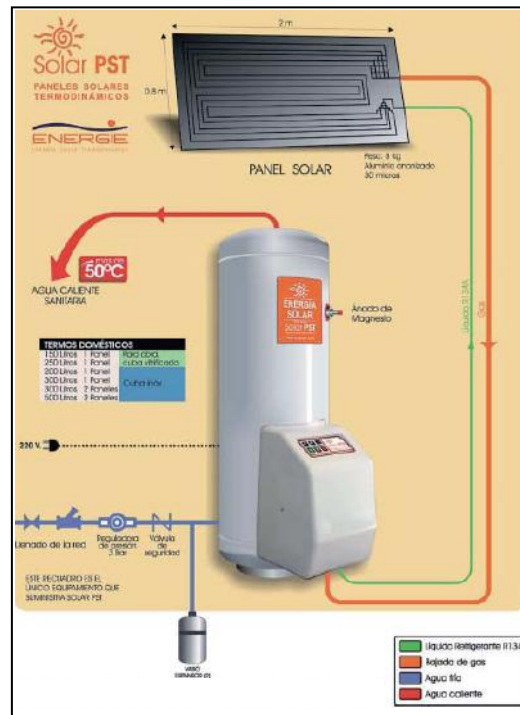


Ilustración 45 Esquema de instalación para ACS. Fuente: dossier técnico empresa SolarPST “Panel Solar Termodinámico Última Generación”.

- **Para Calefacción:** vienen equipados con un intercambiador de calor de placas soldadas de alto rendimiento, un bloque termodinámico con compresor y los paneles.

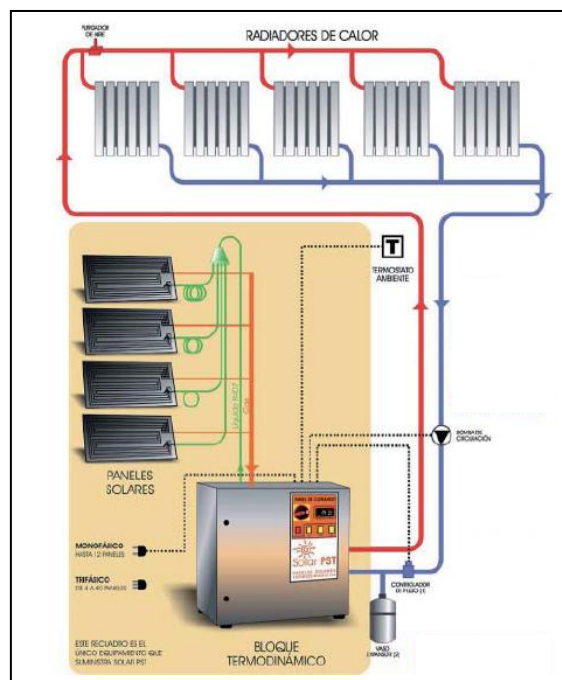


Ilustración 46 Esquema de instalación para calefacción. Fuente: dosier técnico empresa SolarPST “Panel Solar Termodinámico Última Generación”.



- **Para climatización de piscinas:** el sistema se compone de dos intercambiadores de calor tubulares de titanio, un bloque termodinámico con compresor y los paneles.

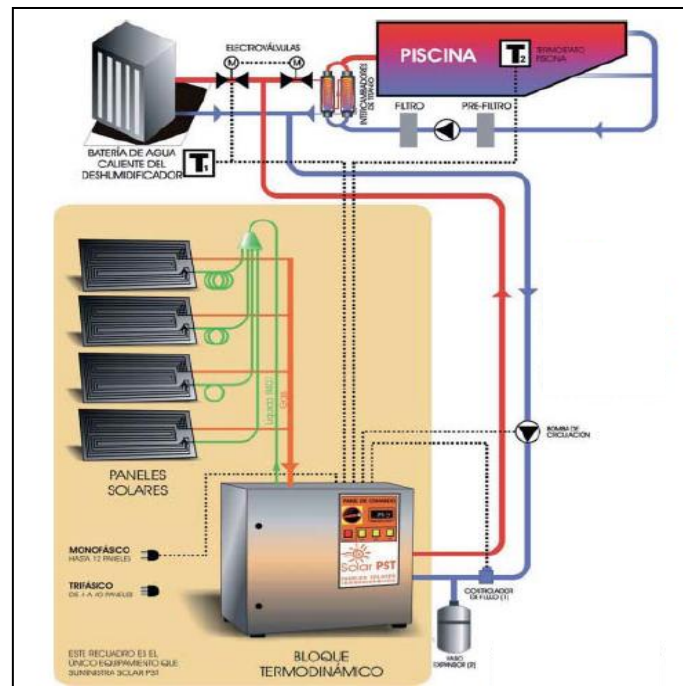


Ilustración 47_ Esquema de instalación para climatización de piscinas. Fuente: dossier técnico empresa SolarPST "Panel Solar Termodinámico Última Generación".

A partir de ahora, vamos a centrarnos en los **paneles solares termodinámicos para aplicaciones de agua caliente sanitaria (ACS)**.

4.2. ESQUEMA GENERAL DE UNA INSTALACIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA CON PANELES SOLARES TERMODINÁMICOS.

Una instalación de paneles solares termodinámicos para ACS consta principalmente de un termoacumulador o depósito de acumulación, un intercambiador de calor, un bloque termodinámico con el compresor incorporado y los paneles solares termodinámicos, además de una válvula de expansión para controlar la presión en las tuberías de la instalación.

La instalación, de forma esquemática, sería la siguiente:

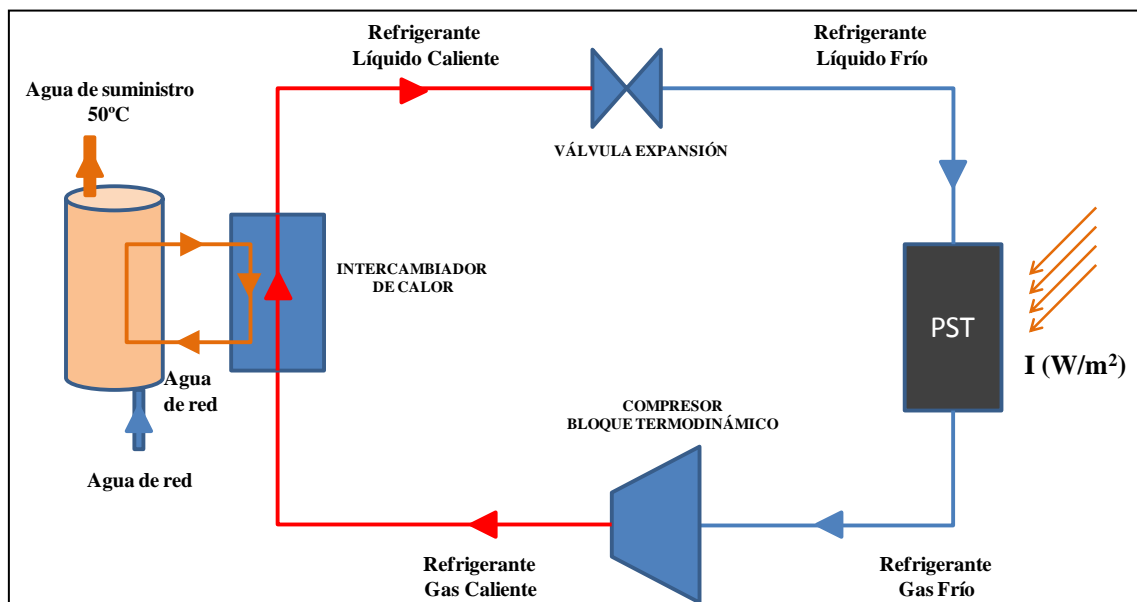


Ilustración 48 Esquema general de una Instalación de Agua Caliente Sanitaria con paneles solares termodinámicos.

Vamos a describir brevemente las principales características de los componentes de una instalación de agua caliente sanitaria con paneles solares termodinámicos.



4.2.1. Características de los Paneles Solares Termodinámicos.

Los paneles solares termodinámicos se diseñan para aprovechar al máximo tanto la radiación directa como difusa y las variaciones de temperatura.

Están fabricados en aluminio y constan de un circuito integrado por el que circula el refrigerante. Para asegurar su protección frente a la oxidación es sometido a un proceso de galvanizado, recubriéndolo con una capa de 30 micras de Zinc. Además se cubre de una capa de pintura anticorrosión negra para proteger al panel frente a la corrosión.

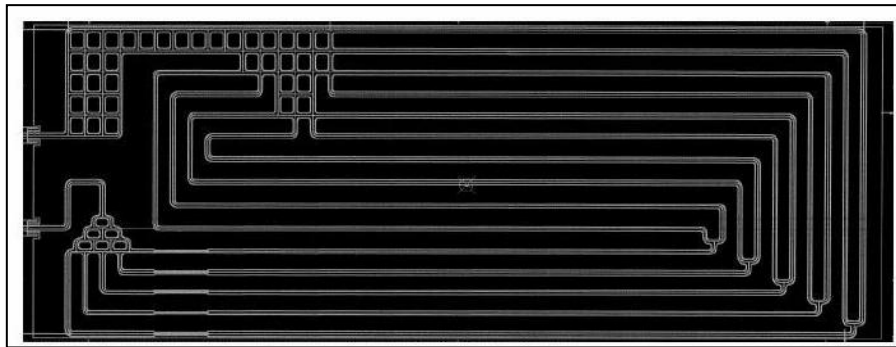


Ilustración 49 Imagen frontal de un panel solar termodinámico.

Las dimensiones generales del panel varían en función de cada proveedor, pero aproximadamente, se encuentran entre los 200 cm de largo, 80 cm de alto y 2 cm de grosor. El peso de cada panel es de unos 8 kilogramos.

4.2.2. Instalación de los Paneles Solares Termodinámicos.

Su inclinación puede variar entre los 10° y 90° respecto a la horizontal, permitiendo su instalación en una amplia variedad de superficies. Se pueden colocar sobre fachadas y estructuras verticales como vallas de separación entre viviendas unifamiliares.



Ilustración 50 Configuraciones de instalación: Paneles Termodinámicos verticales en una valla (izquierda) y Paneles con una inclinación de 45° (derecha).



La distancia mínima entre paneles es de unos 40 cm, permitiendo una alta concentración de paneles en una mínima superficie, siendo posible su uso en edificaciones con superficies reducidas.



Ilustración 51_Soporte de los paneles termodinámicos (Imagen izquierda) y Distancia de separación entre paneles (Imagen Derecha).

4.2.3. Características del Bloque Termodinámico.

El bloque termodinámico contiene los elementos que hacen posible el paso del vapor refrigerante a la temperatura, presión y caudal adecuados. Dentro de él se encuentra el compresor, donde se comprime el vapor refrigerante frío que sale de los paneles termodinámicos, aumentando así su presión y temperatura. Este vapor refrigerante caliente después cederá mediante el uso de un intercambiador de calor parte de su calor al agua de red para su uso como agua caliente sanitaria.

El bloque termodinámico al incorporar un compresor, necesita estar conectado a la red eléctrica y recibir un aporte eléctrico.



Ilustración 52 Selección de Bloques Termodinámicos. Fuente: dossier técnico empresa SolarPST “Panel Solar Termodinámico Última Generación”.



Los bloques termodinámicos están fabricados a medida de cada cliente en función de sus necesidades específicas y del espacio disponible. En aplicaciones de agua caliente de grandes volúmenes el bloque termodinámico y el depósito de acumulación de ACS están separados, utilizando un intercambiador de calor para calentar el agua.

En cambio, en aplicaciones de ACS de pequeños volúmenes, con unas necesidades en torno a los 300 litros de agua, se puede tener el bloque termodinámico y el depósito de acumulación integrados, constituyendo mayor ahorro de espacio y sencillez a la hora de la instalación.



Ilustración 53_ Bloque Termodinámico para aplicaciones de agua caliente sanitaria de pequeño volumen. Imagen obtenida del dossier técnico "Panel Solar Termodinámico Última Generación" de la empresa SolarPST.

4.2.4. Características del Refrigerante.

Un refrigerante es toda sustancia de bajo punto de ebullición capaz de absorber grandes cantidades de calor, al producirse un cambio de estado. En el caso de instalaciones con paneles solares termodinámicos hablamos de refrigerantes líquidos que pasan a vapor y viceversa.

La misión del fluido refrigerante es la de transportar mediante cambios de estado, de presión y de temperatura el calor captado en los paneles hasta la aplicación para el que va a ser usado.

Los principales fluidos refrigerantes utilizados en el mercado son los llamados refrigerantes KLEA, compuestos por hidrofluorocarbonos (HCFCs) que han ido sustituyendo con el tiempo a los refrigerantes clorofluorocarbonados (CFCs) al ser menos perjudiciales para la capa de ozono.

Entre los más utilizados podemos encontrar:

- **R-134a:** sustituye al R-12 en la mayoría de sus aplicaciones de media y alta temperatura.
- **R-407A:** adecuado para instalaciones dónde se usaba el R-22 o R-404A. Compuesto por un 20% de R-32, un 40% de R-125 y un 40% de R-134a.
- **R-407C:** sustitutivo del R-22, es una mezcla ternaria compuesta de R-32 (23%), R-125 (25%) y R-134a (52%).
- **R-410A:** alternativa al R-22, compuesto por una mezcla al 50% de R-32 y R-125.



Las principales características de estos refrigerantes son:

- Poseen una alta estabilidad química ante distintas presiones y temperaturas.
- Incombustibles, no corrosivos y no tóxicos.
- Poseen un elevado nivel de evaporación.
- Son refrigerantes con menor proporción de cloro que los CFCs, por lo que son menos perjudiciales para la capa de ozono y para las personas.
- Son refrigerantes aprobados en la convención de Kioto en 2004 como gases respetuosos con el medio ambiente.

4.2.5. Características del Depósito de Acumulación.

Sus características no difieren de las de otros depósitos de acumulación utilizados en otro tipo de instalaciones. Su forma es cilíndrica y su volumen depende del dimensionamiento de nuestra instalación.

Para un uso doméstico de agua caliente sanitaria, como es nuestro caso, podemos encontrar termo acumuladores con volúmenes entre los 150 y 500 litros, con tamaños comprendidos entre los 1.20 y 1.90 metros de altura, y los 0.55 y 0.80 metros de diámetro.

En aplicaciones de agua caliente sanitaria de grandes volúmenes, los depósitos pueden variar entre los 750 y 6.000 litros, con una altura entre los 2 y 3 metros y un diámetro entre los 0.75 y 1.60 metros.

Fabricados principalmente con aceros inoxidables o con esmalte vitrificado, generalmente para pequeños volúmenes.



Ilustración 54 Depósitos de Acumulación para instalación de ACS con paneles solares termodinámicos. Fuente: dossier técnico empresa SolarPST "Panel Solar Termodinámico Última Generación".



4.2.6. Características del Intercambiador de Calor.

El intercambiador de calor se utiliza para aprovechar el calor del gas refrigerante comprimido que sale del compresor y cederlo al agua de red para su posterior uso como agua caliente sanitaria.

La normativa recomienda que el circuito del refrigerante no intercambie calor en el interior del depósito de acumulación, para evitar posibles daños por contaminación del agua de suministro en caso de que el circuito del refrigerante tenga pérdidas. Si se produjeran pérdidas en el circuito del refrigerante, y éste pasara por el interior del depósito de acumulación, el agua de suministro se vería contaminada, constituyendo un problema para la salud de las personas.

Suelen ser utilizados intercambiadores de calor de placas soldadas inoxidables e intercambiadores de titanio.



Ilustración 55 Intercambiadores de Calor para una instalación de ACS con paneles solares termodinámicos. Fuente: dossier técnico empresa SolarPST "Panel Solar Termodinámico Última Generación".

4.2.7. Características del Vaso de Expansión.

El agua al calentarse, aumenta su volumen. El vaso de expansión amortigua, mediante un cuerpo elástico interno, los excesos de presión en las tuberías de la instalación, evitando posibles daños en el circuito de circulación del refrigerante.

4.2.8. Características del Circuito del Refrigerante.

El circuito por dónde circula el fluido refrigerante está constituido por tuberías de cobre deshidratado con alta resistencia a la corrosión. Para evitar las sobrepresiones en su interior se utiliza el vaso de expansión anteriormente mencionado.



Ilustración 56 Circuito refrigerante: tuberías de cobre deshidratado.

4.3. FUNCIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN.

El principio de funcionamiento de los paneles solares termodinámicos está basado en las leyes de la termodinámica, ya que se aprovechan las propiedades físicas de un gas que al cambiar de estado (líquido-vapor, vapor-líquido) es utilizado para transportar el calor captado por los paneles hasta el agua que se desea calentar.

Este sistema funciona de manera similar a un ciclo de refrigeración. Podemos distinguir un ciclo con una parte fría, otra caliente y un elemento compresor. La parte fría la comprenden los paneles y la parte caliente el intercambiador de calor.

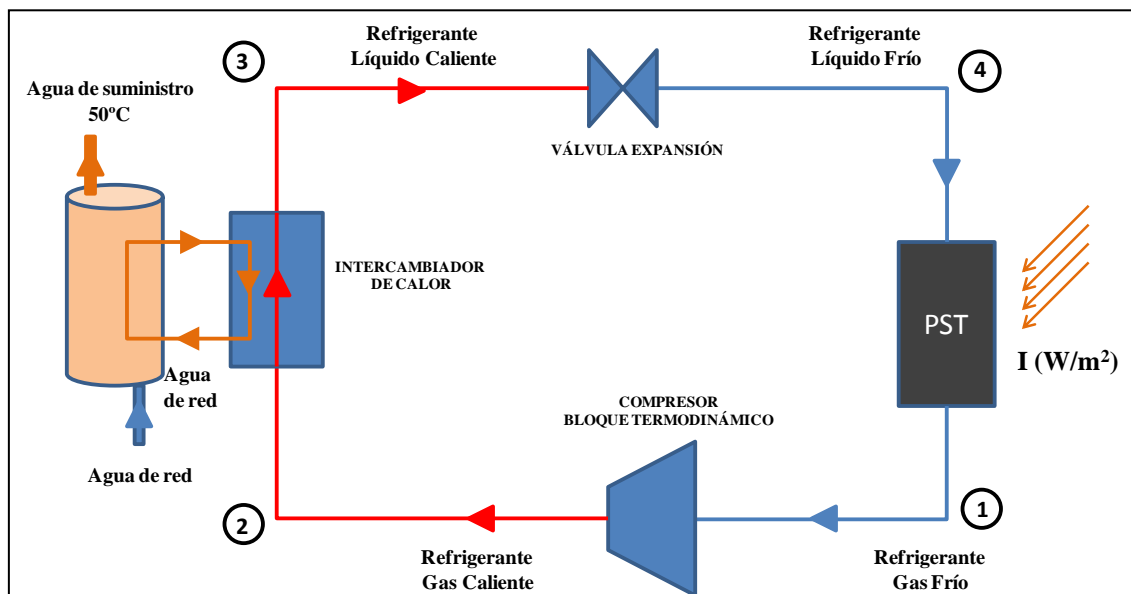


Ilustración 57 Esquema general de una Instalación de Agua Caliente Sanitaria con paneles solares termodinámicos.



El ciclo se lleva a cabo de la siguiente manera:

- Entre los puntos 4-1 del ciclo se encuentran situados los paneles solares termodinámicos. Los paneles actúan como un **evaporador**, absorbiendo el calor procedente de la radiación solar. A la entrada del panel (**punto 4**) el refrigerante se encuentra en estado líquido, y es enviado hacia el panel en forma de micro gotas gracias al vaso de expansión. Cuando las gotas entran en contacto con el calor de los paneles, cambian de estado violentamente convirtiéndose en vapor. Al salir del panel, el vapor se encuentra a una **temperatura comprendida entre la $T_{amb} - 18^{\circ}\text{C}$ de noche y la $T_{amb} + 10^{\circ}\text{C}$ durante el día**.
- Una vez que el vapor refrigerante sale del panel (**punto 1**), es conducido por la tubería de aspiración del compresor donde se comprime y se produce un aumento de presión y temperatura, pudiendo alcanzar los 120°C . De este modo, a la salida del compresor (**punto 2**) tenemos un refrigerante en estado vapor caliente y a mayor presión.
- Una vez que sale del compresor (**punto 2**), el vapor refrigerante entra en el intercambiador de calor, donde cede calor a un circuito de agua en contracorriente que a su vez cederá el calor al agua de red contenida en el depósito de acumulación desde donde se suministrará el agua caliente sanitaria. Es importante que el circuito del refrigerante no entre directamente en el tanque de acumulación e intercambie calor directamente con el agua de suministro, ya que en caso de rotura o filtraciones de las tuberías, el refrigerante podría mezclarse con el agua de suministro, contaminando esta y suponiendo un peligro para la salud de las personas.

En este punto se alcanza la finalidad de la instalación, que es el calentamiento del agua hasta la temperatura de consigna, que estará comprendida entre los $40-60^{\circ}\text{C}$ en función de la aplicación. Además, gracias a la transferencia de calor al agua de red, el refrigerante en estado vapor se licúa a alta presión, cambiando de estado a líquido.

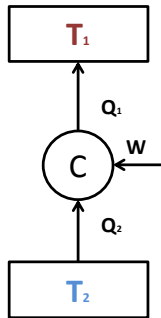
- A la salida del intercambiador (**punto 3**), el refrigerante líquido es depositado en un recipiente llamado “recipiente de líquido”, pasando posteriormente por la válvula o vaso de expansión.
- Entre los **puntos 3-4** se encuentra el vaso de expansión por la que pasa el refrigerante líquido. En el vaso de expansión el refrigerante sufre una reducción de presión y temperatura antes de entrar de nuevo al panel termodinámico, en forma de micro gotas a través de las tuberías de cobre deshidratadas hasta los paneles.
- Una vez que el refrigerante en estado líquido entra en los paneles, se vuelve a repetir el ciclo.



4.4. CÁLCULOS.

El objetivo fundamental de los cálculos que se muestran a continuación es la **obtención del consumo eléctrico de la máquina**.

Como hemos mencionado, el **consumo energético de la máquina** es el trabajo que debe realizar el compresor, y viene determinado a partir del concepto de **coeficiente de eficiencia energética u operación (COP)**:



$$COP = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} \rightarrow COP = \frac{Q_{condensador}}{W_{compresor}}$$

El valor de Q_1 es la cantidad de calor que cedemos al foco caliente, es decir, es el calor que hay que ceder al tanque de acumulación para que el agua caliente alcance la temperatura de suministro (en nuestro caso, 50°C). Este valor Q_1 es la demanda energética que debemos de cubrir para satisfacer las necesidades de suministro, y que hemos calculado en el apartado de demanda energética.

Para los valores del coeficiente de operación, vamos a obtener su curva de funcionamiento a partir de las variables termodinámicas que rigen el comportamiento de la instalación mediante un programa apropiado para ello conocido por el nombre de *Solkane*. Obtendremos una curva de COP frente a la temperatura de placa y para ello, primero deberemos conocer los valores de temperatura del evaporador en cada momento.

De este modo, el consumo eléctrico lo obtendremos despejando de la expresión del coeficiente de operación:

$$COP = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_{condensador}}{W_{compresor}} = \frac{D_{acs}}{W_e} \Rightarrow W_e = \frac{D_{acs}}{COP}$$



4.4.1. Dimensionamiento de la Instalación.

En este punto, tenemos que definir el volumen del depósito de acumulación necesario para acumular el agua caliente sanitaria y el área de paneles termodinámicos necesarios para calentar dicho volumen de acumulación.

El volumen del depósito de acumulación lo vamos a determinar a partir del consumo medio diario de agua caliente. Según los cálculos realizados en el apartado de demanda energética, el consumo medio diario de agua caliente a 50°C es de unos 150 litros/día. Para satisfacer esta demanda de agua debemos escoger un volumen superior de entre los depósitos ofertados por el mercado.

Vamos a escoger un **depósito de acumulación de 300 litros**, de modo que no haya problemas a la hora de satisfacer la demanda de agua.

En cuanto a la superficie de paneles, medidas experimentales realizadas con los paneles termodinámicos nos dicen que para calentar un volumen de 300 litros, necesitaremos colocar **4 paneles de 1.46 m²** cada uno.

Se necesita una superficie de captación alta para poder acumular calor durante el verano, ya que la máquina tiene problemas de funcionamiento durante el día, produciéndose apagones de manera intermitente del compresor de la instalación. Cuanto mayor sea el número de paneles que tengamos, mayor será la superficie del evaporador, consiguiendo captar mayor radiación solar y pudiendo calentar de forma más eficiente el agua.

4.4.2. Cálculo de la Temperatura de Evaporación.

4.4.2.1. Modelo de Ecuaciones para la Temperatura de Evaporación.

El primer paso que hay que dar es el cálculo de la temperatura de evaporación, es decir, la temperatura del refrigerante al paso por el panel termodinámico, que actúa como evaporador.

Para simplificar los cálculos, *consideramos que la temperatura del evaporador va a ser la misma que la temperatura de la placa*. De este modo, podremos tener unos valores de temperatura del evaporador, iguales a los valores de temperatura en la placa exterior del panel, es decir, la cara que está en contacto directo con el ambiente, y que podemos conocer mediante cálculos experimentales ya desarrollados.

Las ecuaciones que van a regir el comportamiento de la temperatura de la placa son obtenidas a partir de resultados experimentales mediante el desarrollo de una serie de ecuaciones, como son, las ecuaciones de la transferencia de calor y la ecuación del ciclo de refrigeración por compresión mecánica.

Las ecuaciones presentes en este modelo y desde las que se fundamentan los cálculos son las siguientes:



- Ecuación de transferencia de calor por conducción o Ley de Fourier:

$$\dot{Q}(W) = -K \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

Donde K ($W/^{\circ}C \cdot m$) es la conductividad térmica y A (m^2) es el área transversal al flujo de calor.

- Ecuación de transferencia de calor por convección:

$$\dot{Q}(W) = h \cdot A_c \cdot (T - T_{\infty})$$

Donde h ($W/^{\circ}C \cdot m^2$) es el coeficiente de convección, A_c (m^2) es el área de contacto entre superficie y fluido, T ($^{\circ}C$) es la temperatura de la superficie y T_{∞} es la temperatura del fluido lejos de la superficie.

- Ecuación de transferencia de calor por radiación o ley de Stefan-Boltzmann:

$$\dot{Q}_r(W) = -\sigma \cdot A \cdot T^4$$

Donde $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$ es la constante de Stefan-Boltzmann.

- Ecuación del ciclo de refrigeración por compresión mecánica:

$$\dot{Q}(W) = \dot{m} \cdot \Delta h$$

Donde Δh (J/kg) es el incremento de entalpía en el condensador, evaporador o compresor de la instalación y \dot{m} (kg/s) es el caudal de refrigerante.

Mediante su desarrollo y resolución a partir de ecuaciones diferenciales se puede llegar a un modelo de ecuaciones general, en el que la **temperatura de la placa se describe como una función dependiente de la temperatura ambiente y de la radiación solar**. Según aumente la radiación solar, la placa tendrá mayor temperatura. De este modo, la temperatura de la placa alcanzará un valor mínimo por la noche, cuando no haya radiación, y un valor máximo correspondiente al punto de mayor radiación solar.

Los resultados del modelo de ecuaciones establecen los siguientes **límites para la temperatura de la placa o del fluido refrigerante en el evaporador**:

$$T_{evap} \simeq T_{placa} = \begin{cases} T_{amb} - 18^{\circ}C & \Rightarrow \text{Noche : } R_{solar} = 0 \\ T_{amb} + 10^{\circ}C & \Rightarrow \text{Día: } R_{max} \end{cases}$$

Ilustración 58 Modelo teórico de ecuaciones para la temperatura de placa o del fluido refrigerante en el evaporador. Resultados desarrollados en el artículo "*Theoretical model and experimental validation of a direct-expansion solar assisted heat pump for domestic hot water applications*" (Amancio Moreno Rodríguez, Universidad Carlos III).

Mediante este modelo podemos obtener los valores extremos de la temperatura de la placa, pero queremos conocer la evolución de la temperatura de placa (y del COP) a lo largo del día.

Para ello, definimos una expresión general que muestre a **la temperatura de la placa como una función que dependa de la temperatura ambiente, más un coeficiente dependiente de la radiación solar**, dada por:

$$T_{evap} = T_{amb} + K(R_{global})$$

Ilustración 59 Modelo Teórico utilizado para la evolución de la temperatura de la placa a lo largo del día.

El **parámetro K** lo obtenemos a partir de una recta de regresión definida entre los valores máximos y mínimos de radiación. Cuando la radiación es nula la temperatura de la placa es la temperatura ambiente más el coeficiente K igual a -18°C , y cuando se alcanza la radiación máxima es igual a la temperatura ambiente más 10°C . De este modo podemos decir:

$$K(R_{global}) = K_{max} + \frac{K_{max} - K_{min}}{R_{max} - R_{min}} \cdot (R_{global} - R_{max})$$

Ilustración 60 Expresión general del parámetro K en función de la radiación global.

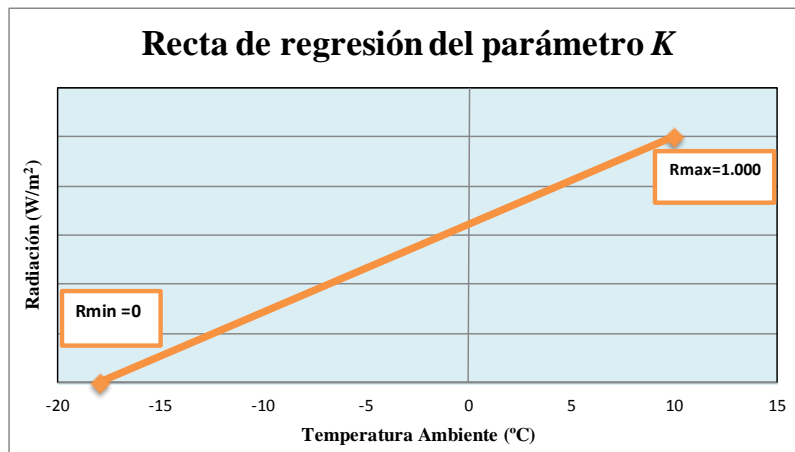


Ilustración 61 Recta de regresión utilizada para el cálculo del parámetro K.

Si tenemos en cuenta las siguientes consideraciones:

- K_{min} corresponde al valor de K igual a -18°C para valores nocturnos.
- K_{max} corresponde al valor de K igual a 10°C para el valor de máxima radiación.
- R_{min} es el valor mínimo de radiación solar registrado sobre la placa a lo largo del año de estudio, es decir, 0 W/m^2 , cuando es de noche.
- R_{max} es el valor máximo de radiación solar sobre la placa registrado a lo largo del año de estudio. Se obtiene un valor en torno a los 1.000 W/m^2 .

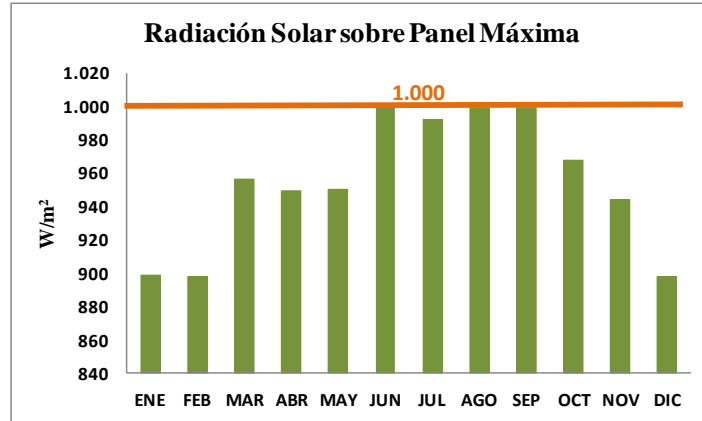


Ilustración 62 Valores Máximos Mensuales de Radiación Solar Incidente sobre el panel y Valor Máximo Anual (R_{max}).

Teniendo en cuenta estas consideraciones, llegamos a la siguiente expresión:

$$K(R_{global}) = 10^{\circ}\text{C} + \frac{28^{\circ}\text{C}}{R_{max}} \cdot (R_{global} - R_{max})$$

Ilustración 63 Expresión del parámetro K en función de la radiación global.

De este modo, la **expresión que obtenemos de la temperatura del evaporador, igual a la temperatura de la placa** es la siguiente:

$$T_{placa} (^{\circ}\text{C}) = T_{amb} + K(R_{global}) = T_{amb} + 10^{\circ}\text{C} + \frac{28^{\circ}\text{C}}{R_{max}} \cdot (R_{global} - R_{max})$$

$$T_{placa} (^{\circ}\text{C}) = T_{amb} + K(R_{global}) = T_{amb} + 10^{\circ}\text{C} + \frac{28^{\circ}\text{C}}{1.000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \cdot \left(R_{global} - 1.000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$$

Se puede comprobar cómo esta ecuación cumple los límites establecidos por el modelo inicial, simplemente calculando los valores de la temperatura de la placa para los valores máximo y mínimo de radiación:

$$\text{Si } R_{global} = R_{min} = 0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \Rightarrow T_{placa_min} (^{\circ}\text{C}) = T_{amb} - 18^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Si } R_{global} = R_{max} = 1.000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \Rightarrow T_{placa_max} (^{\circ}\text{C}) = T_{amb} + 10^{\circ}\text{C}$$

4.4.2.2. Evolución de la Temperatura del Evaporador.

Utilizando los valores de **evaluación media de temperatura ambiente y de radiación solar incidente en un día medio representativo de cada mes**, podemos determinar la **evolución media de la temperatura del evaporador (igual a la temperatura de placa) a lo largo del día medio representativo de cada mes** a partir de la ecuación determinada en el apartado anterior.



Como ya hemos mencionado anteriormente, el **método que vamos a seguir será concentrar la evolución de todos los días de un mes en un único día medio representativo**. De este modo, representaremos la *evolución media de la temperatura de evaporación de un día medio representativo* de cada mes y que concentra todos los días de éste.

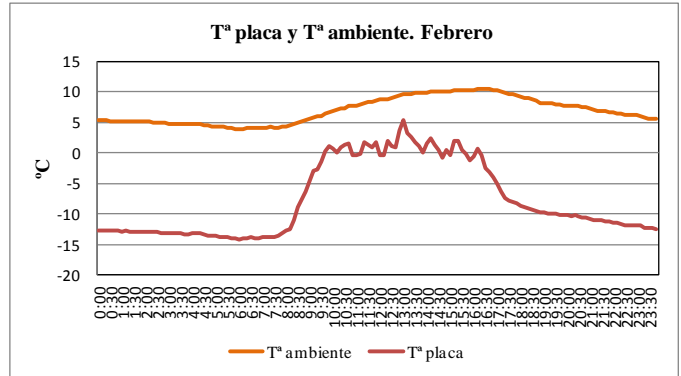
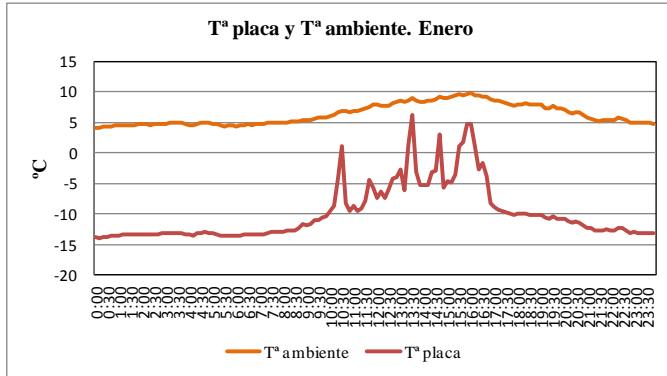


Ilustración 64 Evolución de la Tª de la Placa y la Tª ambiente en día medio representativo. Enero y Febrero.

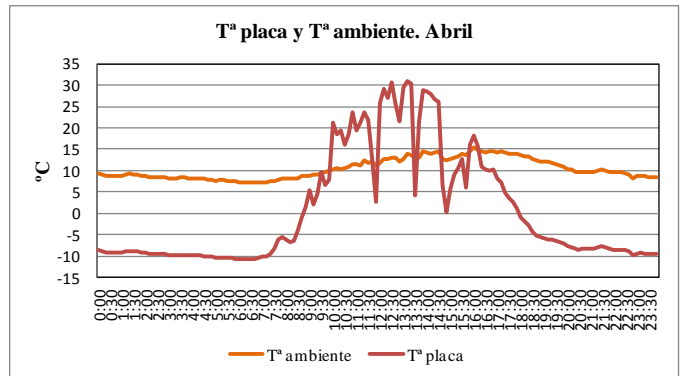
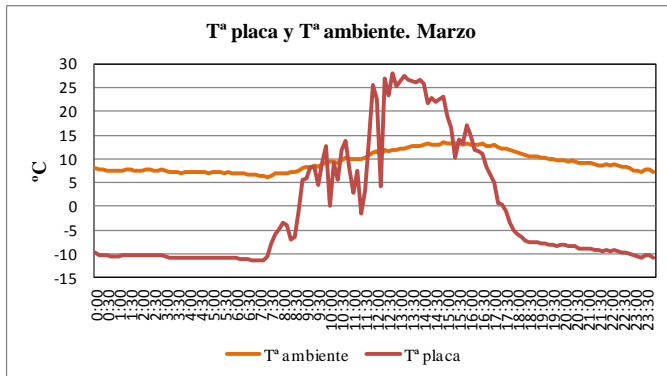


Ilustración 65 Evolución de la Tª de la Placa y la Tª ambiente en día medio representativo. Marzo y Abril.

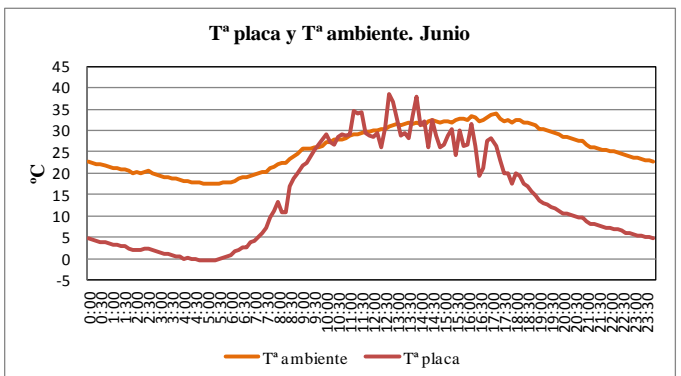
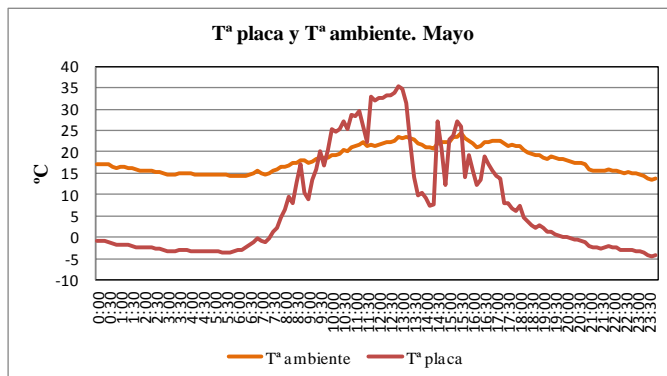


Ilustración 66 Evolución de la Tª de la Placa y la Tª ambiente en día medio representativo. Mayo y Junio.

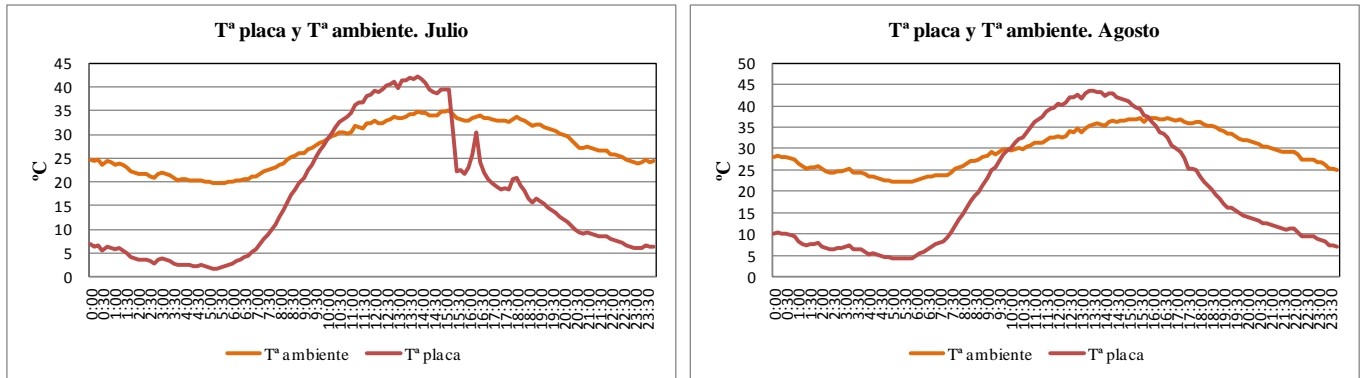


Ilustración 67 Evolución de la Tª de la Placa y la Tª ambiente en día medio representativo. Julio y Agosto.

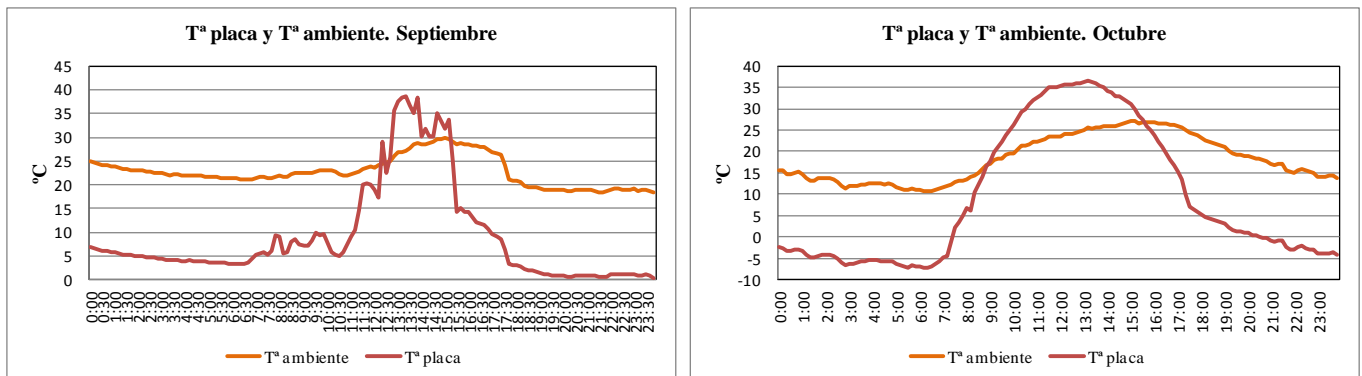


Ilustración 68 Evolución de la Tª de la Placa y la Tª ambiente en día medio representativo. Septiembre y Octubre.

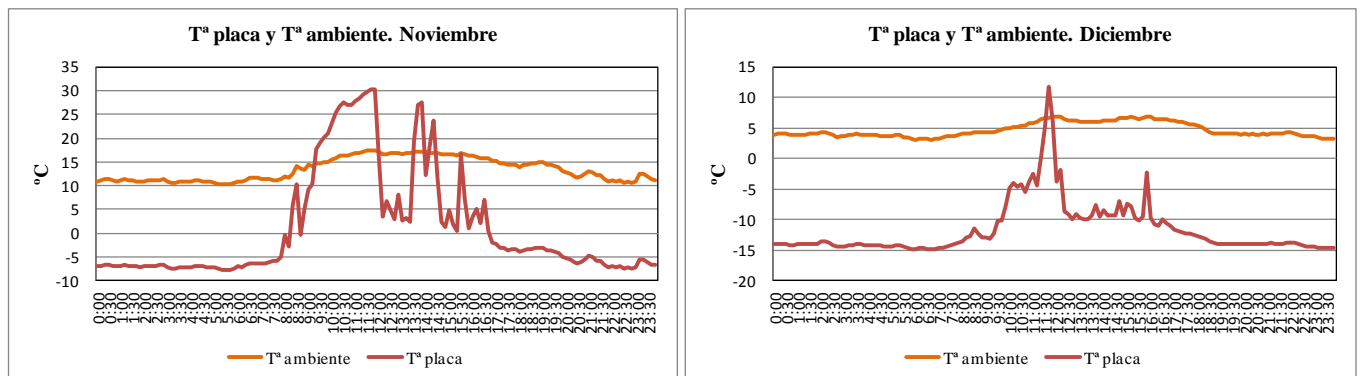


Ilustración 69 Evolución de la Tª de la Placa y la Tª ambiente en día medio representativo. Noviembre y Diciembre.

Por lo general, la temperatura de la placa sigue un determinado patrón diario, que varía en función de la temperatura ambiente y de la intensidad de la radiación solar. Se pueden distinguir tres zonas a lo largo del día:

- i) **Primer sector del día:** desde las 0:00 de la noche hasta el amanecer, entre las 6:00 y 7:30 en función del mes. En este período nocturno, no hay radiación solar y la temperatura de la placa evoluciona paralela a la temperatura ambiente con un valor de unos 18°C menor.

Una vez que amanece y la placa empieza a calentarse por la radiación solar incidente, la temperatura de ésta empieza a crecer a mayor ritmo que la temperatura ambiente en una magnitud determinada por el parámetro K .



- ii) **Sector central del día:** desde que amanece la temperatura ambiente va aumentando, al igual que la radiación solar, provocando que la temperatura de la placa también aumente.

A partir de un determinado valor de radiación, la temperatura de la placa comienza a superar a la temperatura ambiente. El patrón común es que la temperatura de la placa alcance su máximo en las horas de máxima radiación, entre las 12:00 y las 15:00, superando los valores de temperatura ambiente. A partir de aquí, la radiación va decayendo y lo mismo hace la temperatura de la placa. Esto otorga un patrón que idealmente podría tratarse como simétrico.

- iii) **Sector final del día:** una vez que comienza a anochecer, la radiación solar decae hasta cero repitiéndose el comportamiento del primer sector del día.

Además, la curva media de la temperatura de evaporación se caracteriza por la presencia de picos de alta y baja intensidad. Los picos de alta temperatura de evaporación se corresponden con picos de radiación alta y viceversa. Los cambios bruscos en los valores de temperatura de evaporación se deben a cambios bruscos en la radiación incidente, que pueden deberse a la presencia de obstáculos que impiden que se capte radiación, como por ejemplo la presencia de nubes.

4.4.2.3. Evolución diaria de la Temperatura de Evaporación.

A partir de los valores puntuales de temperatura de evaporación obtenemos unos valores medios diarios de temperatura de placa. Representamos los valores de la “**Temperatura de Placa Media Diaria**” comparándolos con los valores medios diarios de la temperatura ambiente:

$$T_{placa\,dia\,i} = \frac{\sum_{j=1}^{144} T_{placa\,j}}{144} \quad \forall i = 1 \dots 365$$

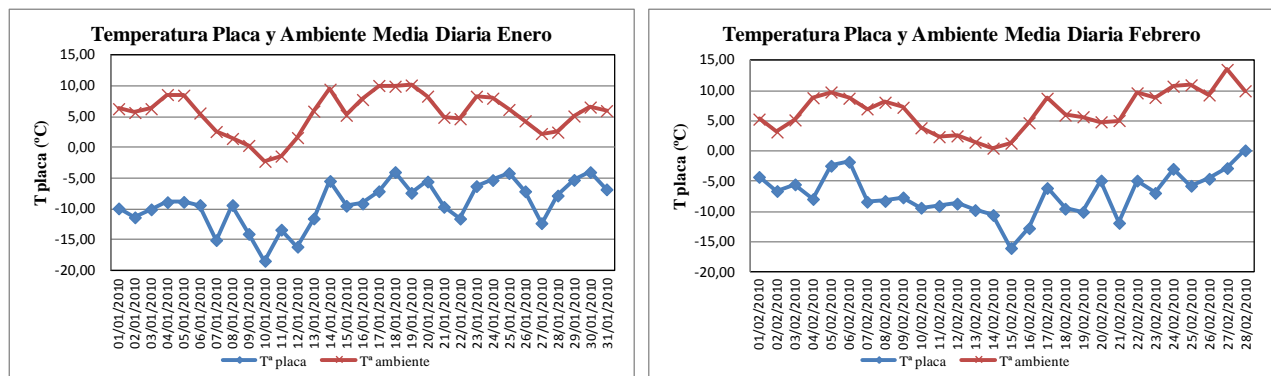


Ilustración 70 Valores de Temperatura de la Placa Media Diaria frente a Temperatura Ambiente. Enero y Febrero.

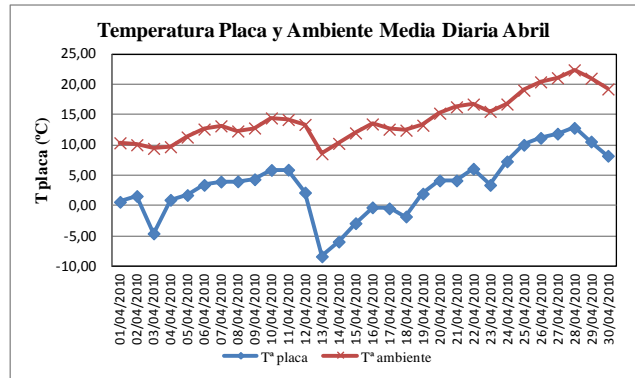
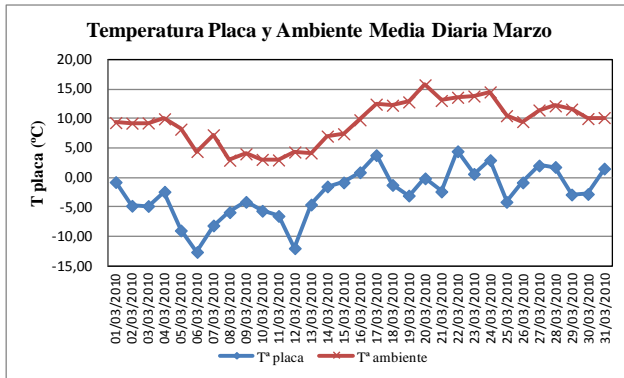


Ilustración 71 Valores de Temperatura de la Placa Media Diaria frente a Temperatura Ambiente. Marzo y Abril.

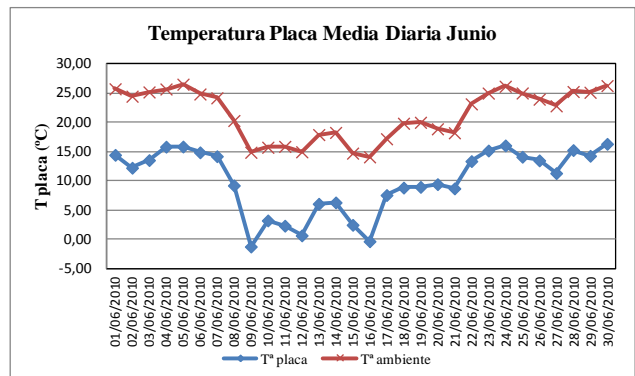
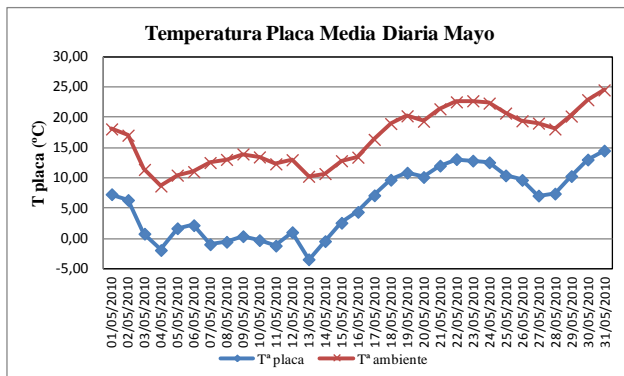


Ilustración 72 Valores de Temperatura de la Placa Media Diaria frente a Temperatura Ambiente. Mayo y Junio.

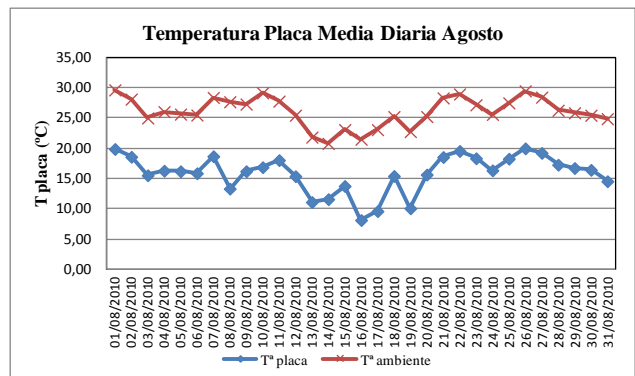
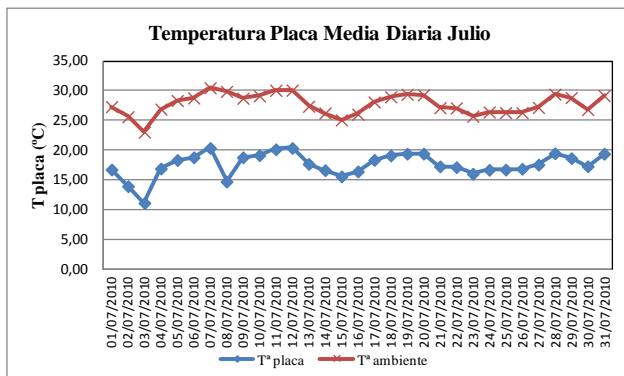


Ilustración 73 Valores de Temperatura de la Placa Media Diaria frente a Temperatura Ambiente. Julio y Agosto.

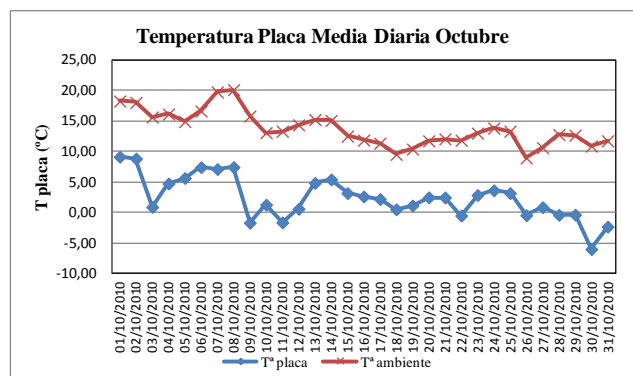
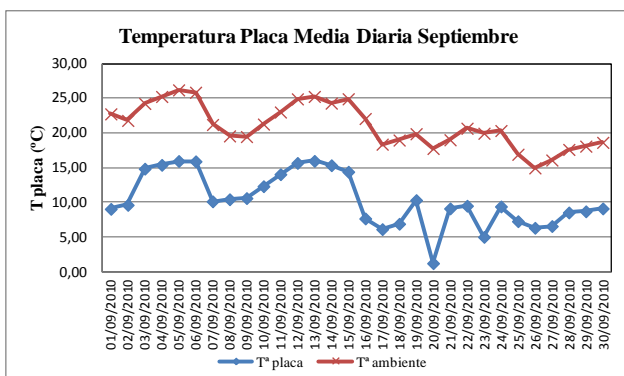


Ilustración 74 Valores de Temperatura de la Placa Media Diaria frente a Temperatura Ambiente. Septiembre y Octubre.

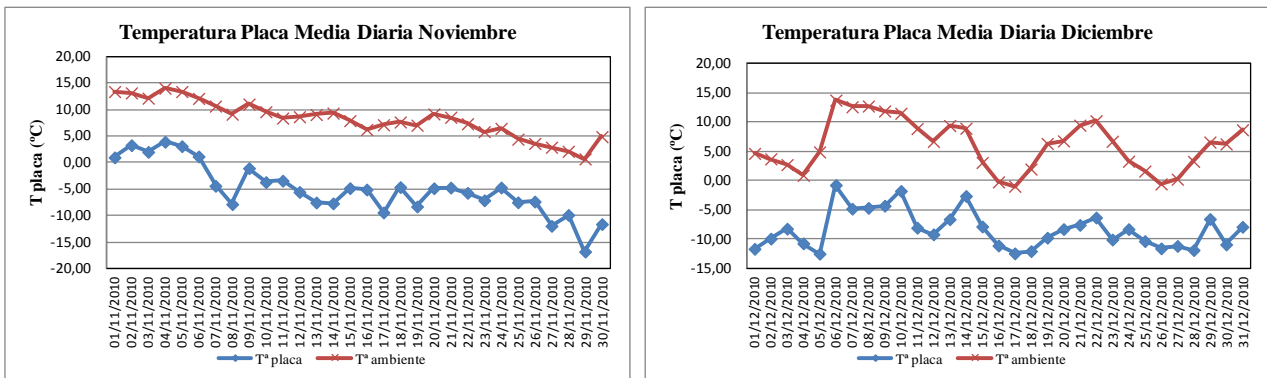


Ilustración 75 Valores de Temperatura de la Placa Media Diaria frente a Temperatura Ambiente. Noviembre y Diciembre.

Al promediar estos valores y obtener un valor medio para cada día del año se obtienen unos valores de la temperatura de la placa media diaria inferiores a los equivalentes valores de temperatura ambiente.

4.4.3. Cálculo del Coeficiente de Eficiencia Energética o de Operación (COP).

Una vez que hemos obtenido los valores de temperatura de la placa, vamos a calcular los valores de eficiencia de la máquina. Obtendremos una curva teórica para el coeficiente de operación en función de la temperatura de la placa, y la compararemos con los resultados experimentales de la máquina.

Para obtener la **curva teórica del COP** basada en nuestras condiciones de estudio, vamos a utilizar el programa de representación gráfica de ciclos de refrigeración, “**Solkane 7.0**”. Introduciendo las condiciones de funcionamiento del ciclo, obtendremos una serie de puntos de temperatura de placa y coeficiente de operación, mediante los que podremos obtener una curva.

Las condiciones de funcionamiento del ciclo utilizadas son las siguientes:

- **Temperatura de evaporación del refrigerante:** hemos considerado que es igual a la temperatura de la placa y la hemos calculado en el apartado anterior. Tomaremos una gama de puntos entre los -20°C y 30°C para obtener los valores de la curva de COP.
- **Temperatura de condensación:** es una temperatura fija igual a la temperatura de suministro del agua caliente sanitaria (50°C) más un salto térmico por irreversibilidades en el intercambiador de calor (8°C).
- **Recalentamiento:** para asegurar que el vapor refrigerante tras el evaporador (paneles termodinámicos) se ha evaporado completamente y que no queden gotas de líquido que

puedan dañar el compresor, se mantiene más tiempo el vapor en el evaporador y así asegurar que aumente su temperatura en unos 5°C, valor escogido para el recalentamiento.

- **Subenfriamiento:** para asegurar que tras el condensador el refrigerante es líquido por completo, se enfría unos 8°C más antes de su entrada a la válvula de expansión.
- **Rendimientos:** tenemos en cuenta un rendimiento isentrópico de valor 0,8. Además de un rendimiento eléctrico y mecánico, cuyo producto tiene un valor de 0,75.
- **Pérdidas:** tenemos en cuenta un 15% de pérdidas de calor en alta presión debido a los elementos auxiliares.

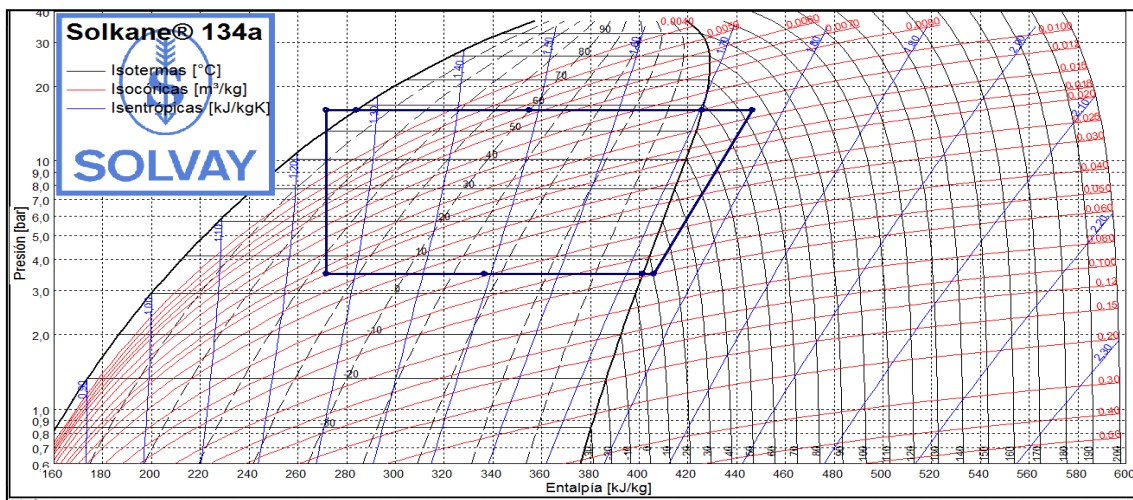


Ilustración 76 Diagrama de presión-entalpía para el ciclo de refrigeración del R134a.

Para obtener los valores del coeficiente de operación tenemos que utilizar su expresión definida como el cociente entre la potencia calorífica decidida por el condensador y la potencia eléctrica generada por el compresor:

$$COP = \frac{Q_{condensador}}{W_{compresor}} = \frac{D_{acs}}{W_c}$$

A partir de esto, representamos varios puntos de funcionamiento variando la temperatura de evaporación y obtenemos los valores necesarios para calcular el coeficiente de operación. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:



T_{ev} (°C)	T_{cd} (°C)	Recalentamiento (°C)	Subenfriamiento (°C)	Q_{cd} (kW)	W_{comp} (kW)	COP Teórico
-20	58	5	8	1,56	0,75	2,09
-15	58	5	8	1,5	0,67	2,25
-10	58	5	8	1,45	0,60	2,42
-5	58	5	8	1,39	0,52	2,67
0	58	5	8	1,35	0,47	2,89
5	58	5	8	1,3	0,40	3,25
10	58	5	8	1,26	0,35	3,63
15	58	5	8	1,23	0,31	4,01
20	58	5	8	1,19	0,25	4,70
25	58	5	8	1,16	0,21	5,44
30	58	5	8	1,13	0,17	6,52

Ilustración 77 Puntos de funcionamiento de la instalación de paneles termodinámicos. Temperatura de evaporación, potencia del condensador, trabajo del compresor y coeficiente de operación. Valores obtenidos mediante la simulación del ciclo de refrigeración con el programa "Solkane 7.0"

Con estos puntos obtenemos la **curva de funcionamiento teórica** y ajustamos sus valores a una recta de regresión polinómica de grado dos, que nos permite obtener una ecuación que nos servirá para representar la evolución del coeficiente de operación:

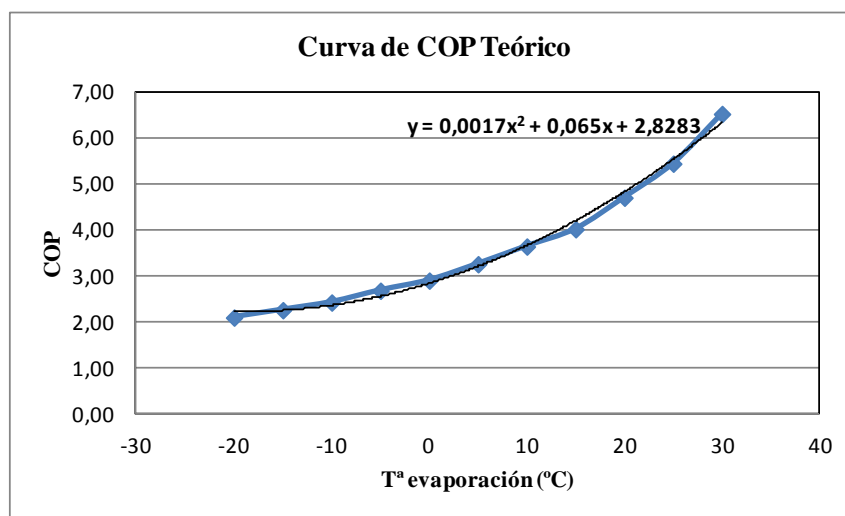


Ilustración 78 Curva teórica del coeficiente de operación frente a la temperatura del evaporador y recta de regresión. Obtenida a partir de los puntos de funcionamiento de la instalación.

La ecuación obtenida nos servirá para representar la evolución teórica del COP durante el día a partir de la temperatura de placa obtenida en el apartado anterior. Viene dada por:

$$COP = 0,0017 \cdot T_{placa}^2 + 0,065 \cdot T_{placa} + 2,8283$$

Ecuación de la recta de regresión del Coeficiente de Operación teórico.

Podemos comparar los **valores teóricos de COP** obtenidos **con los resultados experimentales** de la máquina, mediante la siguiente gráfica:

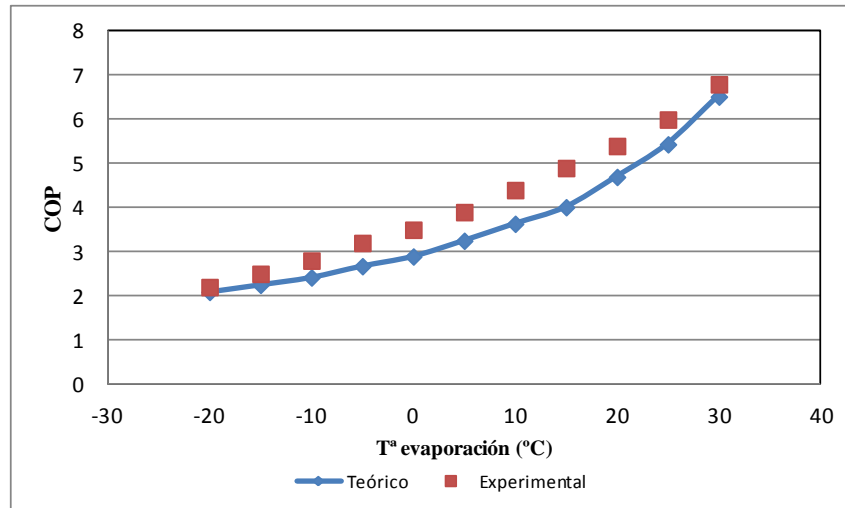


Ilustración 79 COP teórico vs COP Experimental en función de la Temperatura de la placa.

Podemos ver que la curva teórica calculada a partir de las condiciones de funcionamiento de la instalación se asemeja a los valores experimentales, teniendo unos valores de coeficiente de operación más bajos que en la realidad.

4.4.3.1. Evolución del Coeficiente de Eficiencia Energética o de Operación.

Partiendo de la ecuación que define la curva teórica del coeficiente de operación y con los valores de temperatura de evaporación obtenidos, calculamos la evolución del COP para cada día del año.

Al igual que con la temperatura de evaporación, el **método que vamos a seguir será concentrar la evolución de todos los días de un mes en un único día medio representativo.** Únicamente tenemos que utilizar los valores de la evolución media de la temperatura de evaporación y aplicar la ecuación del coeficiente de operación obtenida antes.

De este modo, realizamos los cálculos y **representamos la evolución media del coeficiente de eficiencia energética de un día medio representativo de cada mes y que concentra todos los días de éste.**

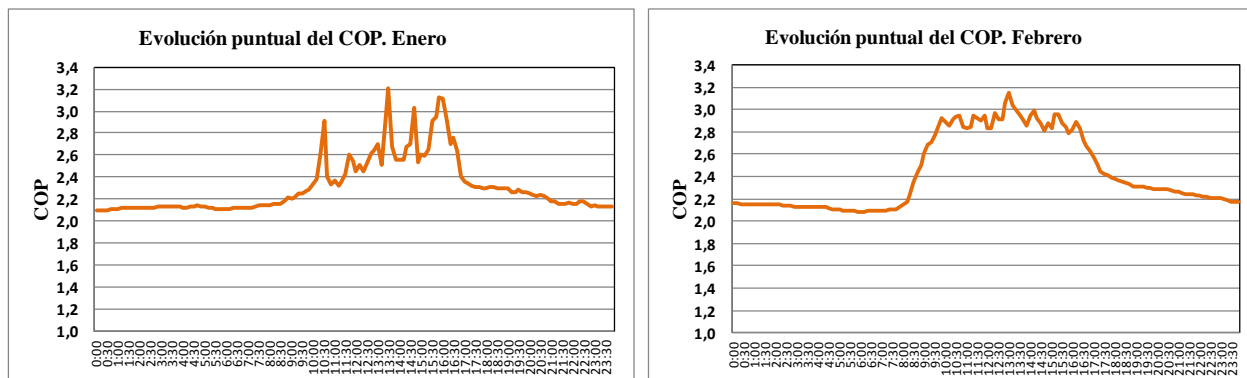


Ilustración 80 Evolución del Coeficiente de Operación en día medio representativo. Enero y Febrero.

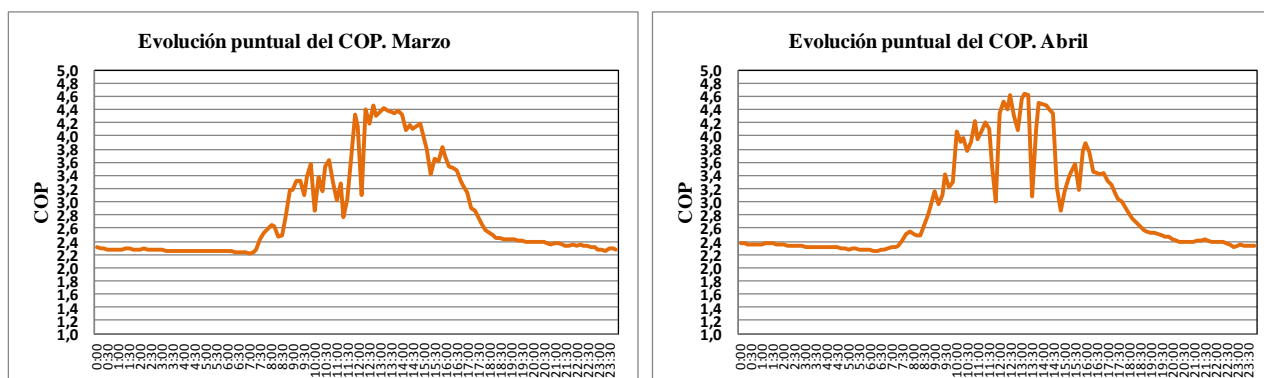


Ilustración 81 Evolución del Coeficiente de Operación en día medio representativo. Marzo y Abril.

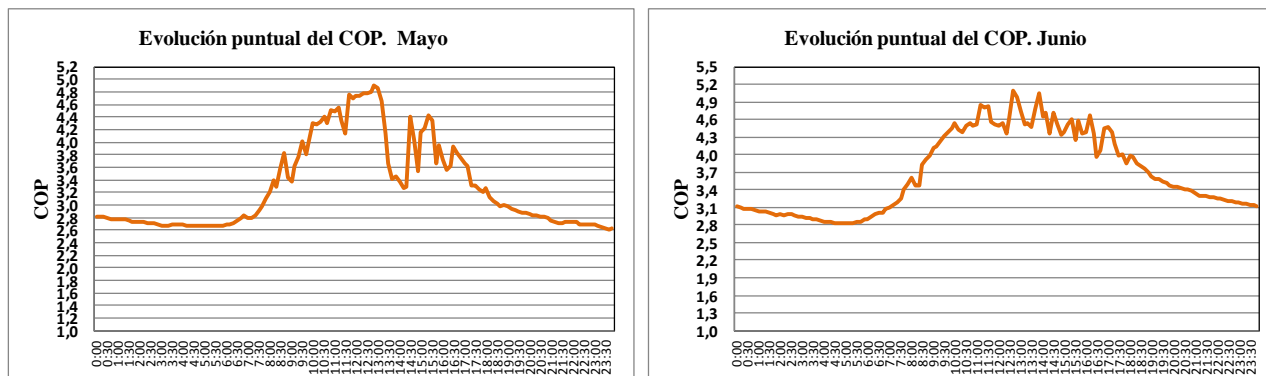


Ilustración 82 Evolución del Coeficiente de Operación en día medio representativo. Mayo y Junio.

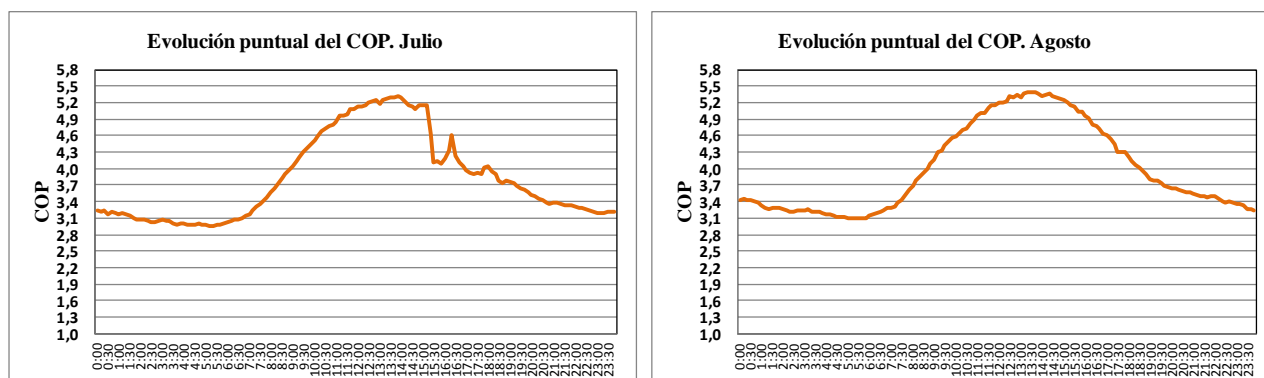


Ilustración 83 Evolución del Coeficiente de Operación en día medio representativo. Julio y Agosto.

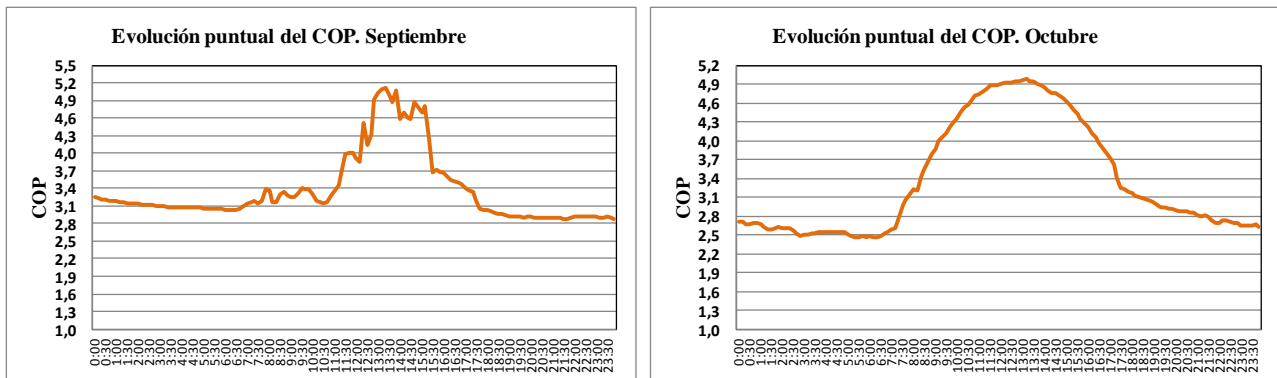


Ilustración 84 Evolución del Coeficiente de Operación en día medio representativo. Septiembre y Octubre.

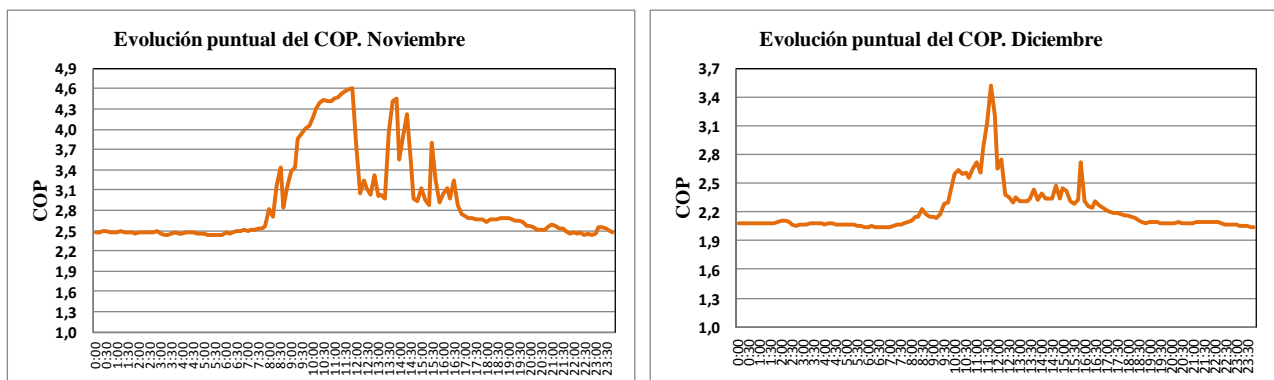


Ilustración 85 Evolución del Coeficiente de Operación en día medio representativo. Noviembre y Diciembre.

Podemos obtener una serie de conclusiones sobre el COP:

- Se obtienen mejores valores de COP a mayores valores de temperatura de evaporación.
- Por eso, en las horas centrales del día, cuando la radiación es mayor, la temperatura de evaporación es mayor y por eso los valores de COP son mejores.
- En los meses de verano, con valores más altos de radiación y temperatura de placa, se obtienen valores más altos de COP.
- Los picos de eficiencia se corresponden con picos de temperatura de evaporación, que como ya explicamos, se deben a la existencia de picos de radiación.

4.4.3.2. Coeficiente de Operación Medio Diario.

Promediando los valores del coeficiente de operación, podemos obtener unos valores diarios medios o valores de “**Coeficiente de Operación Medio Diario**”:

$$COP_{dia-i} = \frac{\sum_{j=1}^{144} COP_j}{144} \quad \forall i = 1 \dots 365$$

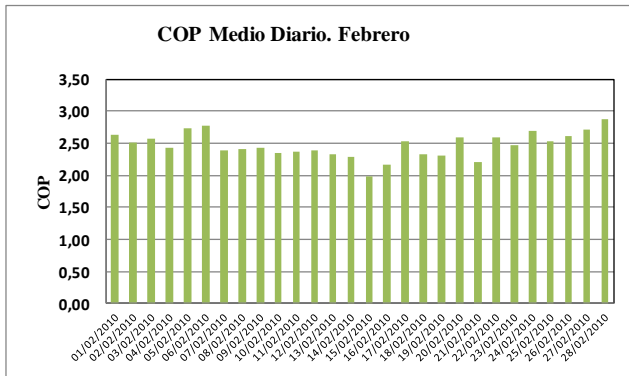
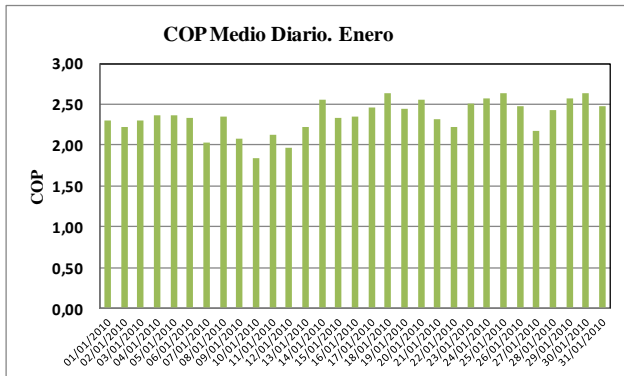


Ilustración 86 Evolución del Coeficiente de Operación Diario Medio. Enero y Febrero.

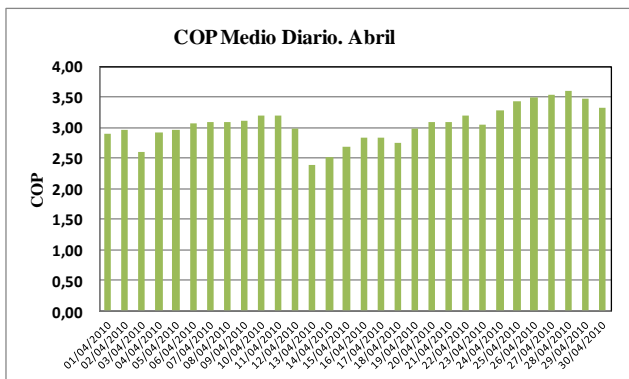
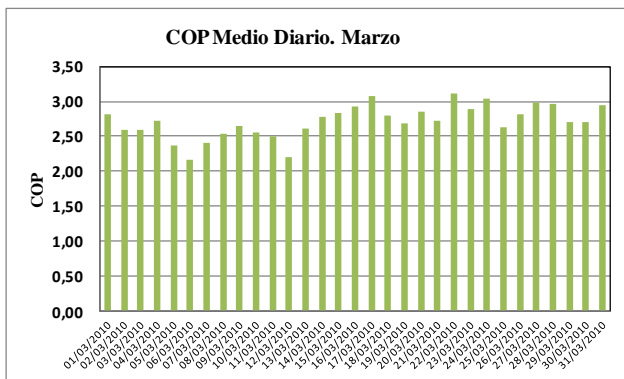


Ilustración 87 Evolución del Coeficiente de Operación Diario Medio. Marzo y Abril.

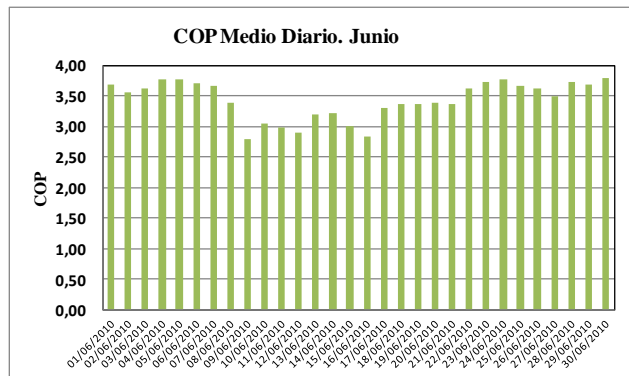
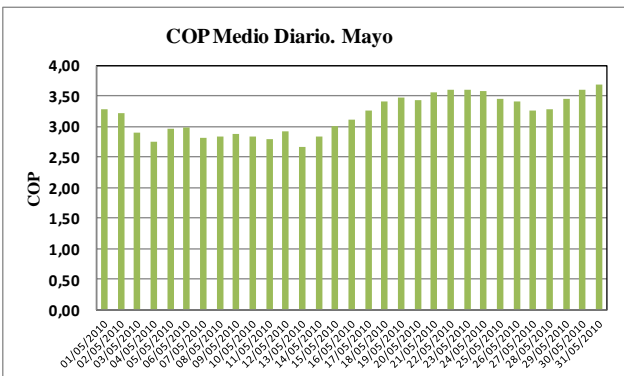


Ilustración 88 Evolución del Coeficiente de Operación Diario Medio. Mayo y Junio.

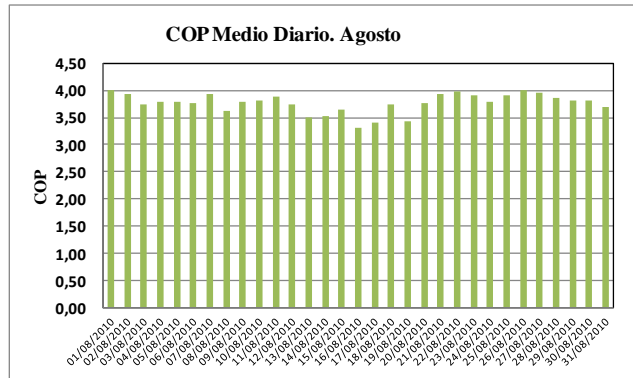
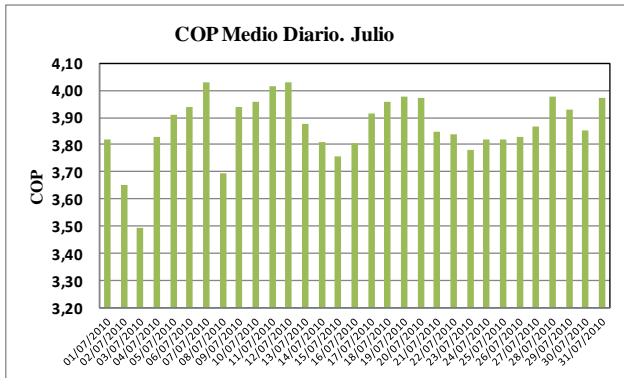


Ilustración 89 Evolución del Coeficiente de Operación Diario Medio. Julio y Agosto.

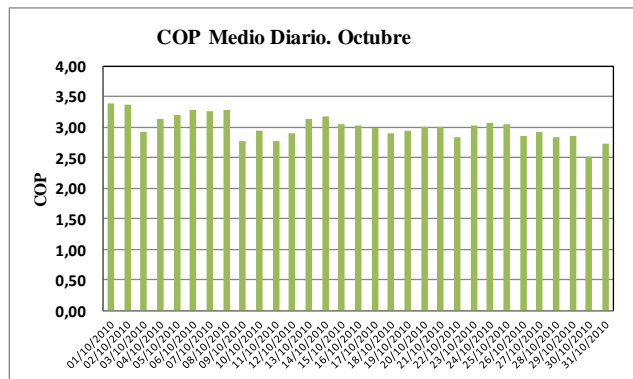
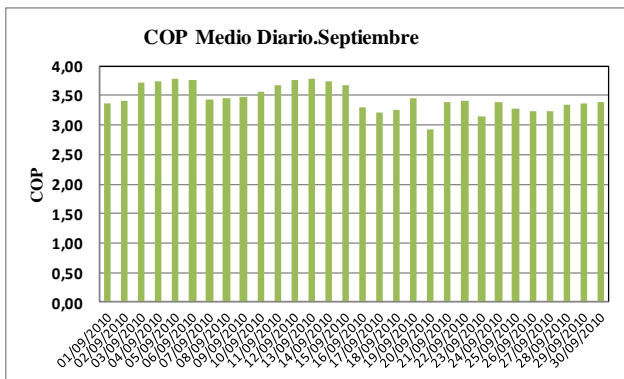


Ilustración 90 Evolución del Coeficiente de Operación Diario Medio. Septiembre y Octubre.

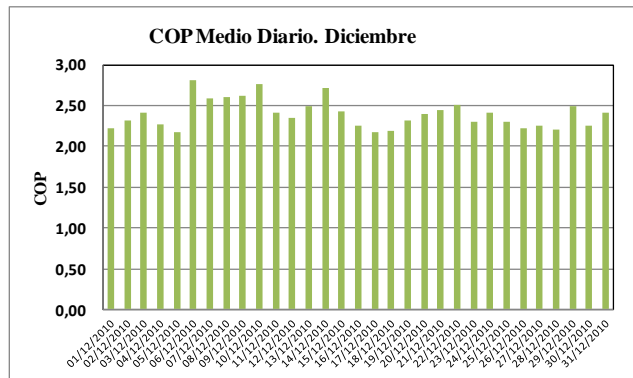
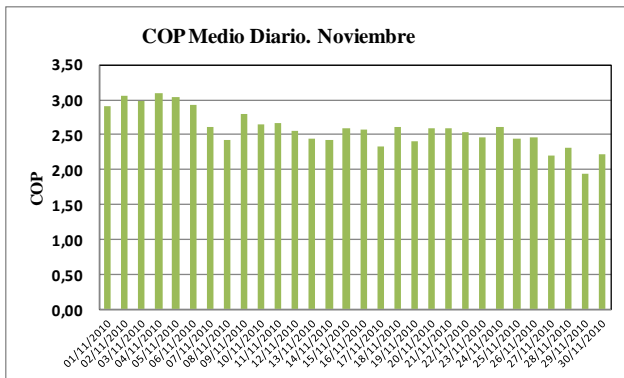


Ilustración 91 Evolución del Coeficiente de Operación Diario Medio. Noviembre y Diciembre.

4.4.3.3. Coeficiente de Operación Medio Mensual.

Promediando de nuevo, podemos obtener unos valores del coeficiente de operación medios mensuales. En la gráfica se pueden ver los valores de “*Coeficiente de Operación Medio Mensual*”:

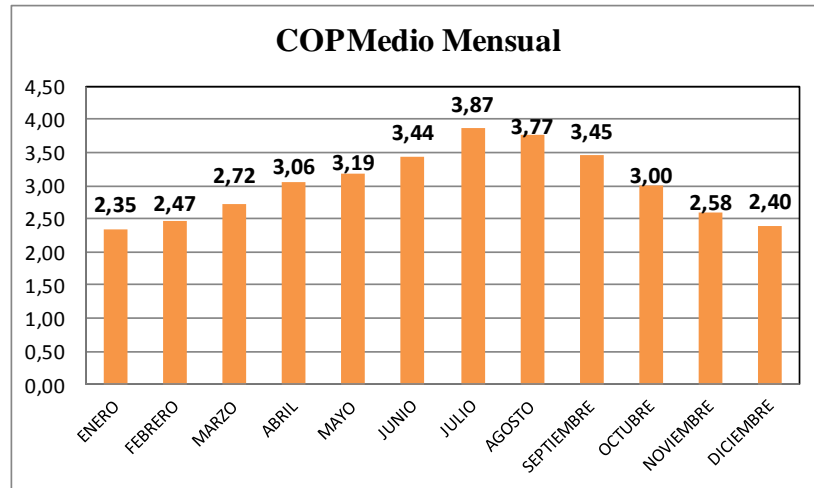


Ilustración 92 Valores del Coeficiente de Operación Medio Mensual.

Vemos que se alcanzan mayores valores del COP durante los meses centrales del año. Es lo que se decía en las medidas experimentales, en las que el coeficiente de operación crecía con la temperatura de la placa. Al ser mayor la temperatura ambiente en los meses centrales, la temperatura de la placa también lo es, de modo que se obtienen mayores valores de coeficiente de operación. De este modo, el promedio de estos valores es mayor en los meses centrales del año, como en verano.

4.4.4. Cálculo del Consumo de la Máquina.

Para obtener el consumo de la máquina, debemos de recurrir a la definición de coeficiente de operación:

$$COP = \frac{Q_{condensador}}{W_{compresor}} = \frac{D_{acs}}{W_c} \Rightarrow W_e = \frac{D_{acs}}{COP}$$

El consumo de la máquina, dado por el compresor, se obtiene como el cociente entre la demanda energética y el coeficiente de operación, ambos anteriormente calculados.

El comportamiento real de estas instalaciones consiste en un compresor que puede trabajar a cualquier hora del día, según demanda, de modo que el agua se va calentando poco a poco y se acumula en el tanque de acumulación para su consumo durante los picos de demanda de agua. La máquina consume energía según la temperatura del tanque, que se puede considerar casi constante y de las condiciones ambiente (temperatura ambiente y radiación) gracias a un termostato.

Representar este comportamiento es complicado, por eso a la hora de realizar los cálculos **vamos a considerar un consumo energético constante**, que se reparta de forma uniforme durante el día. Para poder realizar esto, vamos a comenzar calculando los valores de consumo energético mensual y diario.



4.4.4.1. Consumo Energético Mensual de la máquina.

A partir de los valores mensuales de demanda energética y COP, y utilizando la expresión definida para el consumo energético, podemos obtener las medidas del “*Consumo Energético Mensual*” de la máquina.

$$W_{e\text{mes}} = \frac{D_{acs}}{COP_{mes}}$$

Las cifras se recogen en la siguiente tabla:

	Dacs Mensual a 50°C (MJ)	COP Mensual	Consumo Energético mensual (MJ)
Enero	841,1	2,35	357,7
Febrero	745,6	2,47	302,1
Marzo	794,4	2,72	292,4
Abril	738,6	3,06	241,6
Mayo	747,6	3,19	234,3
Junio	708,4	3,44	206,2
Julio	716,5	3,87	185,2
Agosto	732,1	3,77	194,3
Septiembre	723,5	3,45	209,5
Octubre	763,2	3,00	254,1
Noviembre	768,7	2,58	297,6
Diciembre	841,1	2,40	350,8

Ilustración 93 Consumo Energético Mensual (MJ). Obtenido a partir de valores mensuales de Demanda Energética y COP.

Representando los valores obtenidos de forma gráfica podemos ver cómo es su evolución:

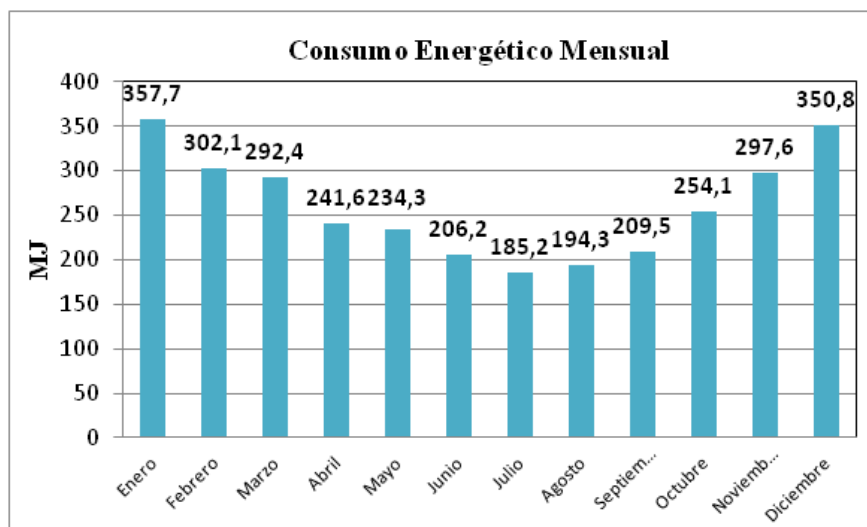


Ilustración 94 Evolución gráfica del Consumo Energético Mensual (MJ).



Observando su evolución se llega a la conclusión de que en los meses centrales del año, sobre todo en verano, cuando la necesidad de agua caliente es menor que en el resto del año, el consumo energético también es menor. Comparando el mes con mayor consumo (Enero, 357.7 MJ) con el mes de menor necesidad energética (Julio, 185.2 MJ) la diferencia es del 48,2% de desviación.

Podemos ver la proporcionalidad entre el consumo y la demanda energética en la siguiente gráfica:

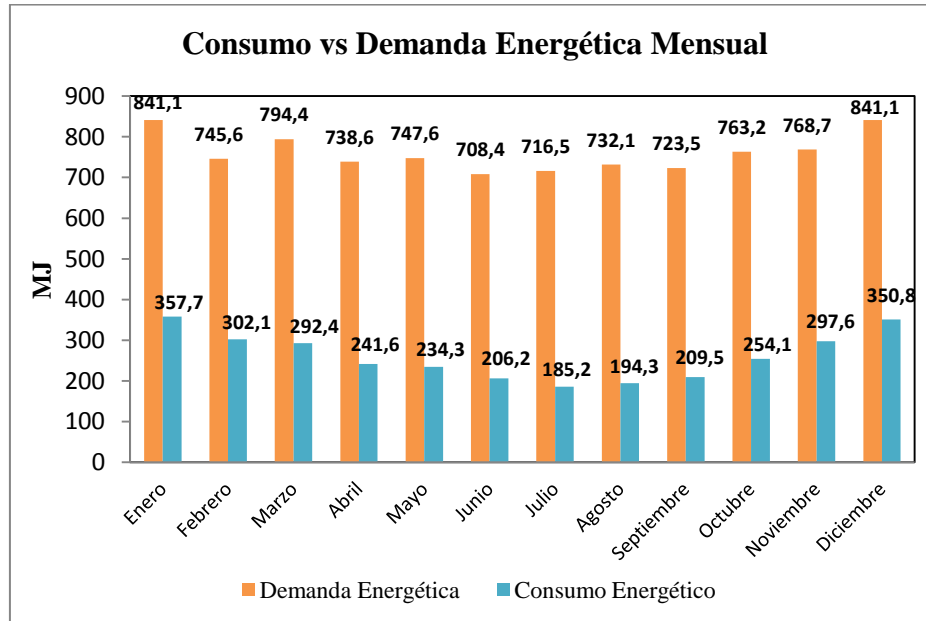


Ilustración 95 Evolución gráfica del Consumo Energético Mensual vs la Demanda Energética.

4.4.4.2. Consumo Energético Diario de la máquina.

La distribución diaria del consumo energético se puede obtener partiendo de las medidas diarias de demanda energética y coeficiente de operación, anteriormente calculadas y utilizando la expresión definida para el consumo energético:

$$W_{e\text{ día}} = \frac{D_{acs}}{COP_{\text{ día}}}$$

Una vez realizados los cálculos, podemos ver la distribución del “Consumo Energético Diario” en las siguientes gráficas:

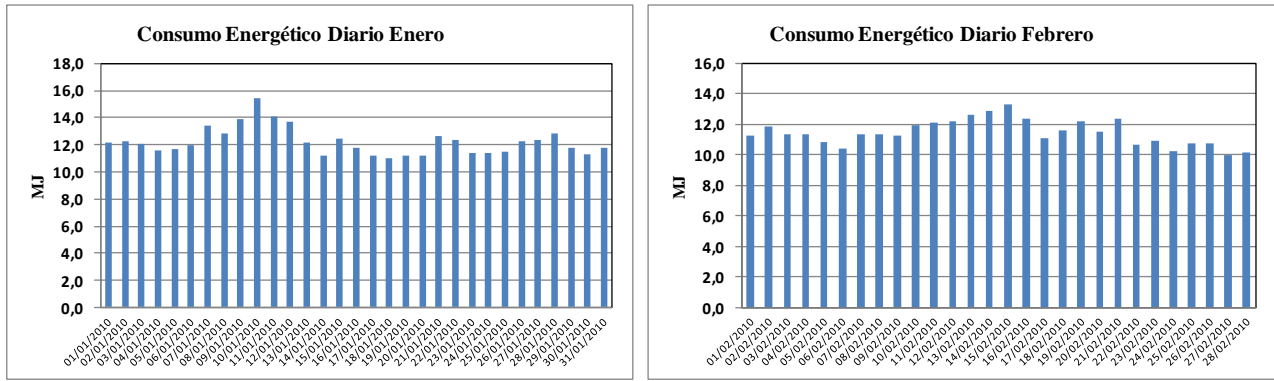


Ilustración 96 Consumo Energético Diario. Enero y Febrero.

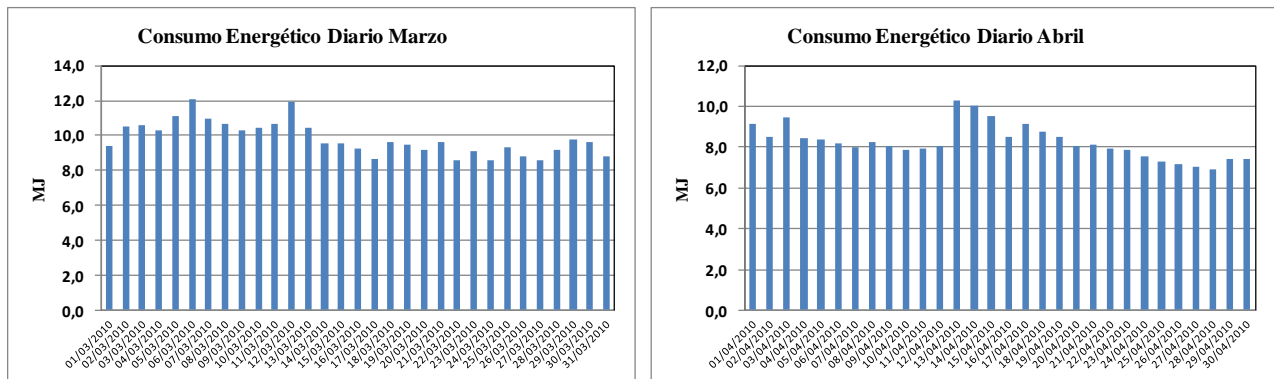


Ilustración 97 Consumo Energético Diario. Marzo y Abril.

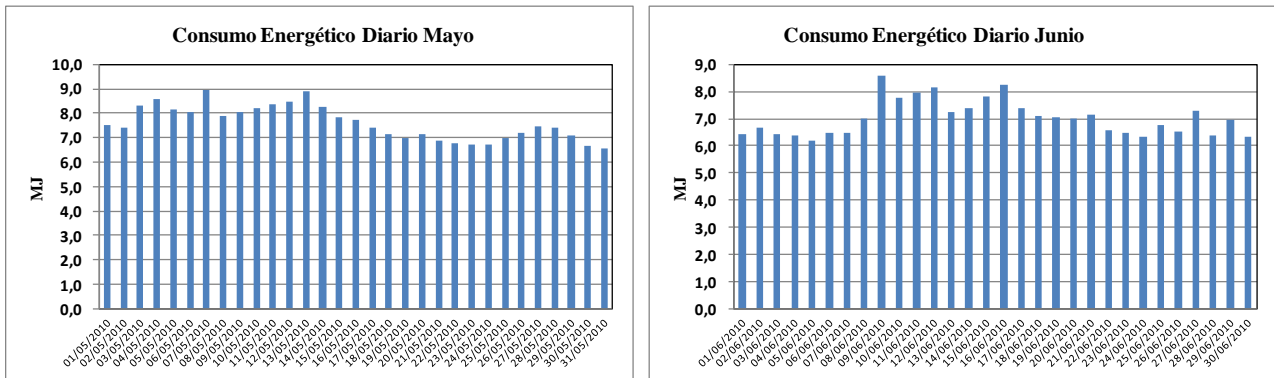


Ilustración 98 Consumo Energético Diario. Mayo y Junio.

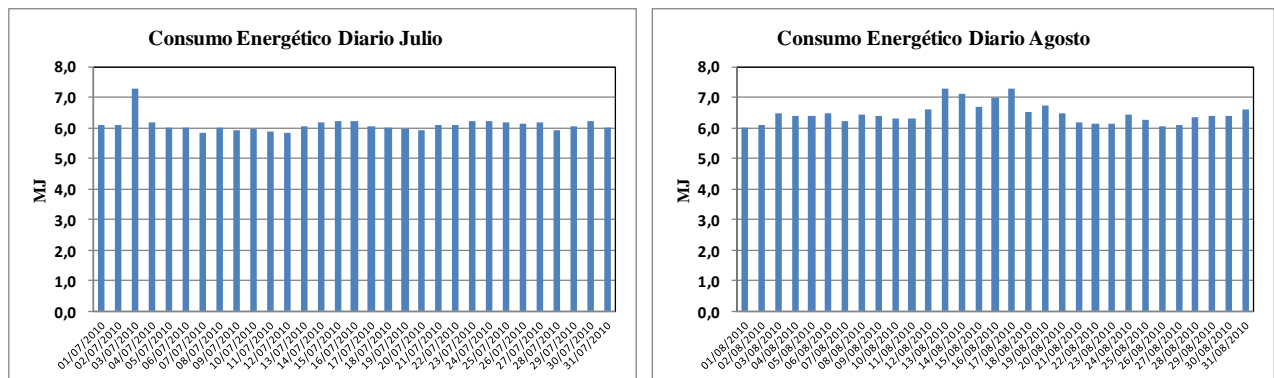


Ilustración 99 Consumo Energético Diario. Julio y Agosto.

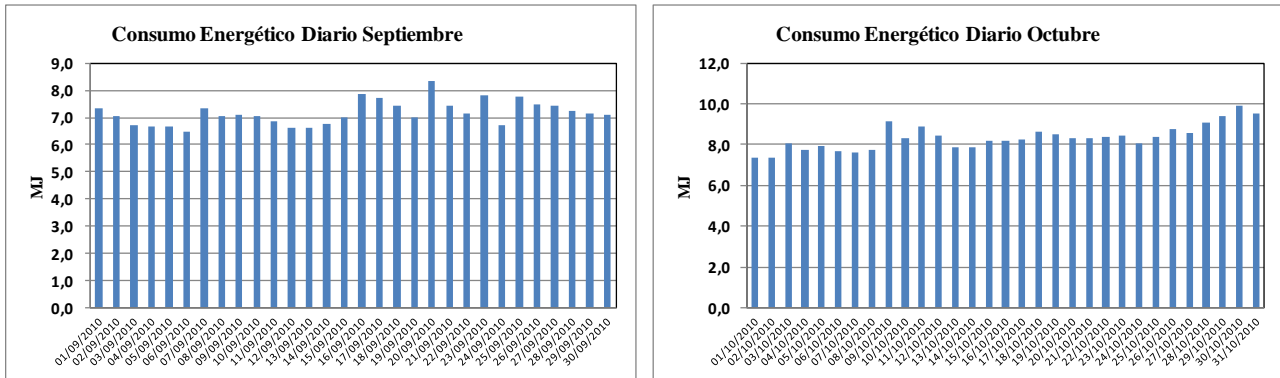


Ilustración 100 Consumo Energético Diario. Septiembre y Octubre.

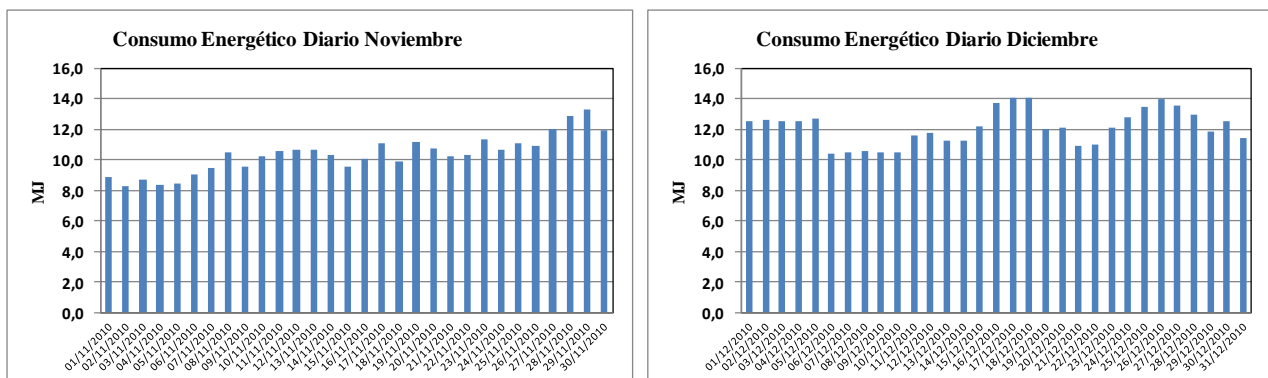


Ilustración 101 Consumo Energético Diario. Noviembre y Diciembre.

La evolución diaria del consumo energético nos lleva a una serie de conclusiones:

- A pesar de tener una medida diaria característica de demanda energética constante, al tener medidas diarias variables de coeficiente de operación, nos permite obtener **valores de consumo energético diferentes para cada día**.
- El **consumo energético es menor en los meses centrales** del año que en el resto de meses. Se debe a dos factores fundamentalmente: el primero consiste en que la demanda energética diaria es menor en los meses centrales del año, como el verano, que durante el resto del año; la segunda se debe a que en los meses centrales del año se tienen valores del COP más altos ya que la temperatura de la placa es mayor que en el resto del año.

4.4.4.3. Evolución del Consumo Energético a lo largo del día.

Se puede hacer por aproximación el cálculo para todo el día, ya que como hemos mencionado, la máquina puede trabajar en cualquier hora del día según demanda.



Debemos partir de los valores de consumo energético diario, y considerarlo uniforme durante todo el día, pudiendo decir que:

$$W_{e10min} = \frac{W_{e\text{ día}}}{144}$$

Ilustración 102 Ec. utilizada para el consumo energético puntual (medidas cada 10 min, 144 medidas por día).

Para representarlo, utilizaremos el mismo método usado con la temperatura de evaporación y con el coeficiente de eficiencia y calcularemos la **evolución del consumo durante un día medio representativo del mes** y que concentre todos sus días:

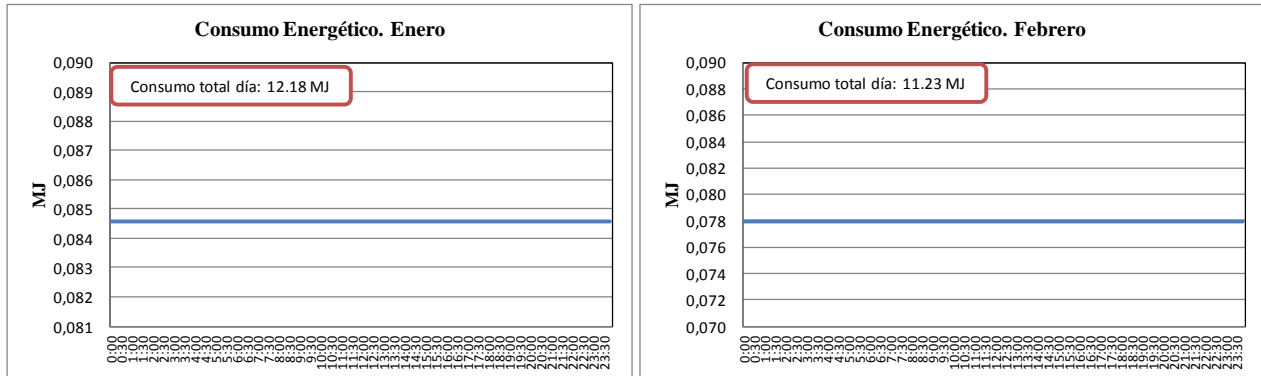


Ilustración 103 Consumo energético puntual constante y consumo total de día medio representativo. Enero y Febrero.

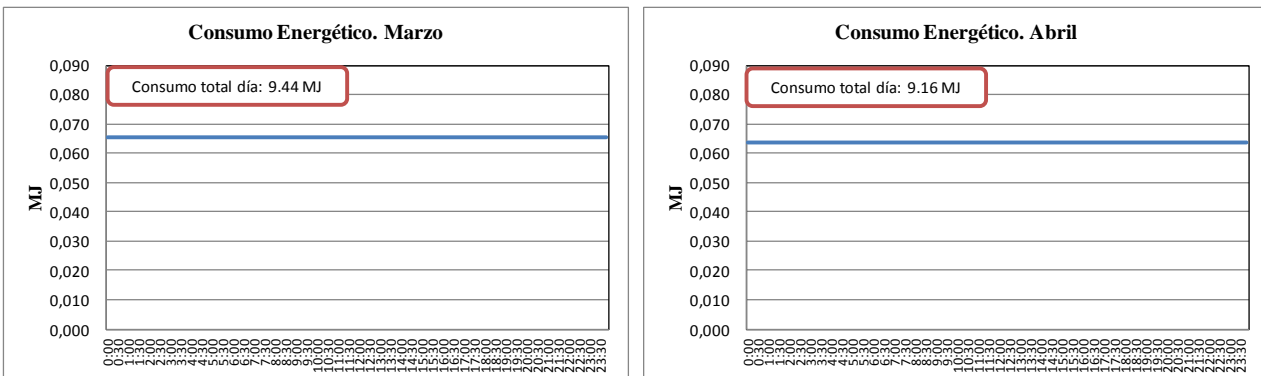


Ilustración 104 Consumo energético puntual constante y consumo total de día medio representativo. Marzo y Abril.

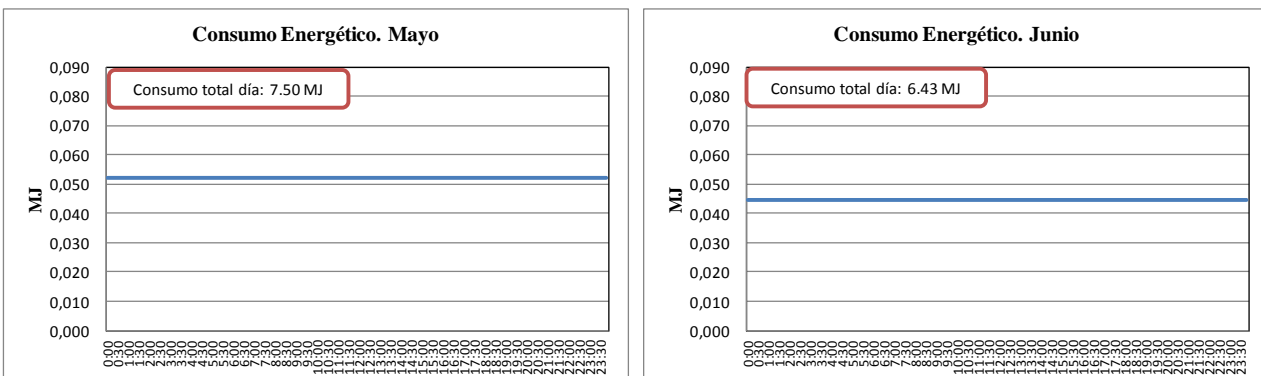


Ilustración 105 Consumo energético puntual constante y consumo total de día medio representativo. Mayo y Junio.

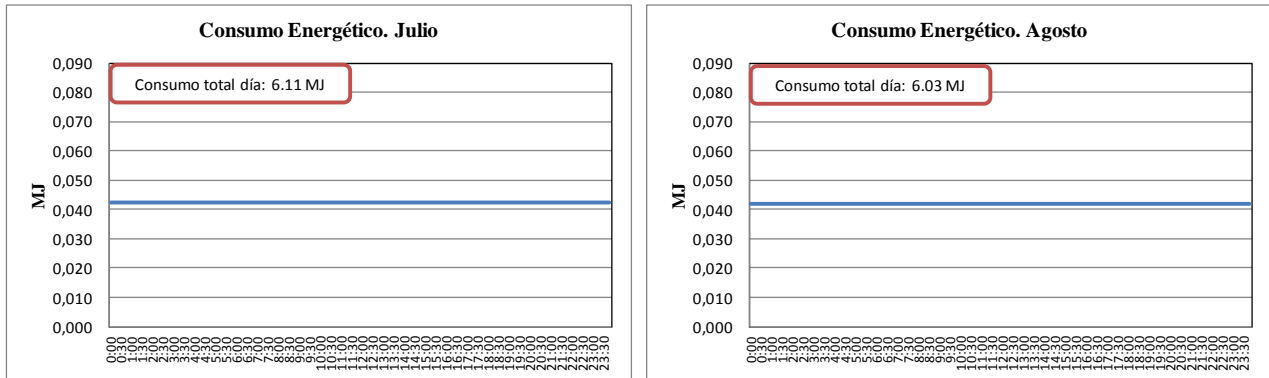


Ilustración 106 Consumo energético puntual constante y consumo total de día medio representativo. Julio y Agosto.

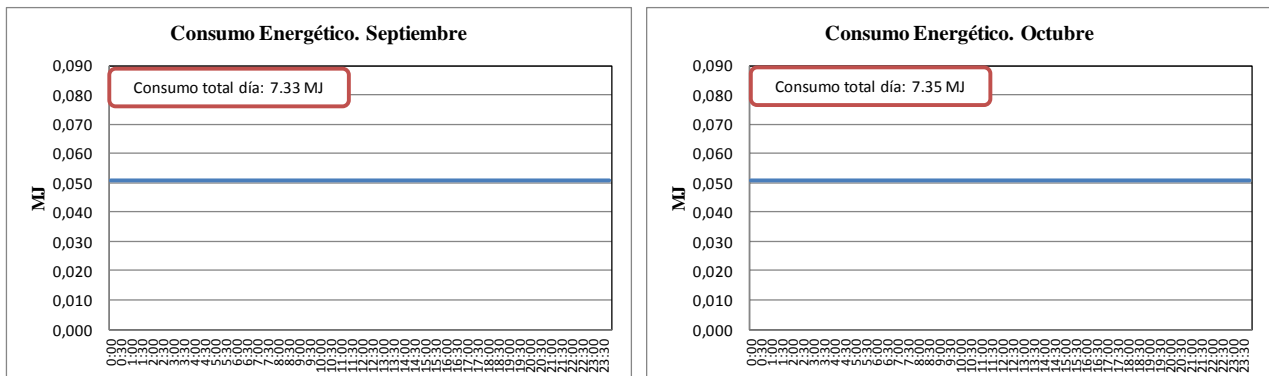


Ilustración 107 Consumo energético puntual constante y consumo total de día medio representativo. Septiembre y Octubre.

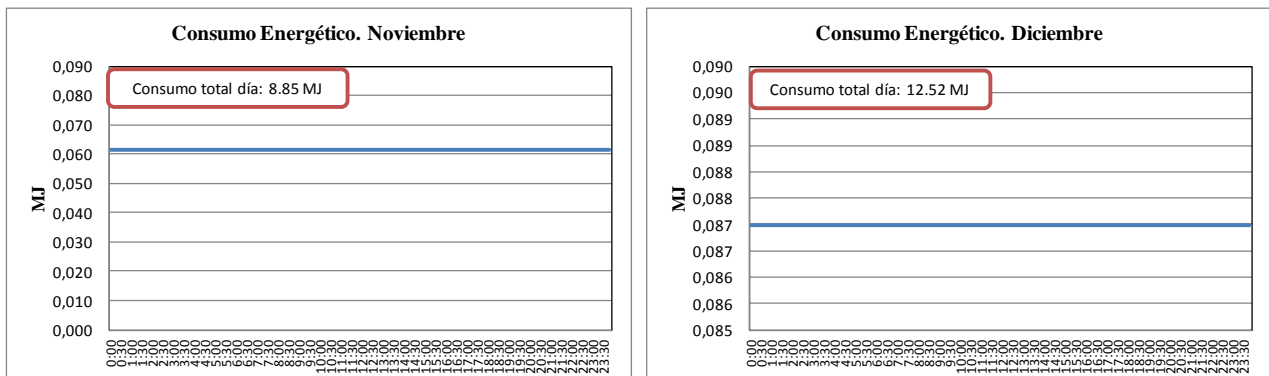


Ilustración 108 Consumo energético puntual constante y consumo total de día medio representativo. Noviembre y Diciembre.

Comparando la evolución a lo largo del día del consumo energético y de la demanda, podemos hacernos una idea del comportamiento de la máquina. Tenemos un consumo energético constante, procedente de la energía que necesita el compresor para ir moviendo el fluido refrigerante por el circuito de la instalación y así calentar el agua que se va acumulando en el tanque de acumulación. Y tenemos unos picos de demanda energética, procedentes de las necesidades de agua caliente de los consumidores de la vivienda.

Podemos verlo gráficamente, enfrentando los valores de consumo y demanda, y hacernos una idea de las magnitudes de ambas variables mediante sus valores diarios medios:

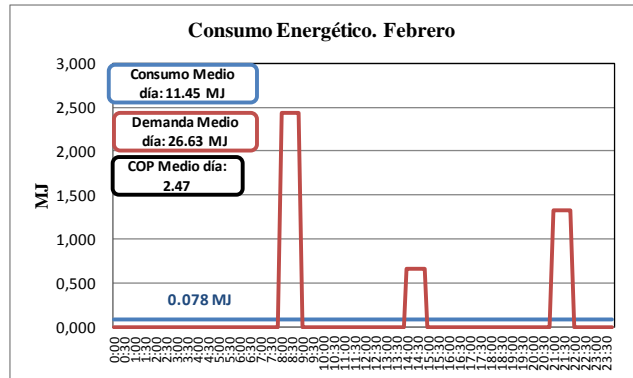
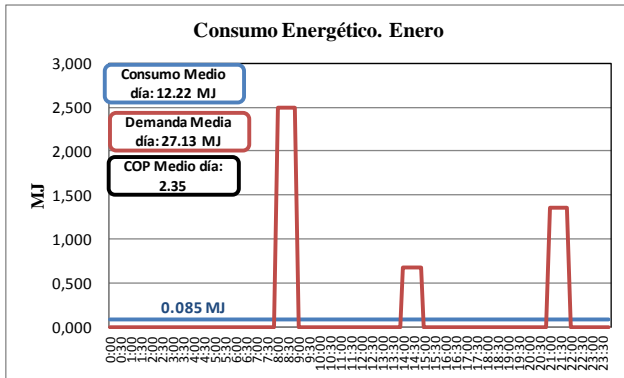


Ilustración 109 Evolución del Consumo y la Demanda Energética durante día medio representativo. Enero-Febrero.

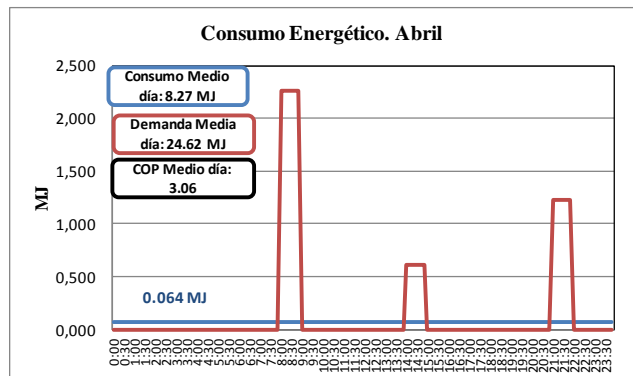
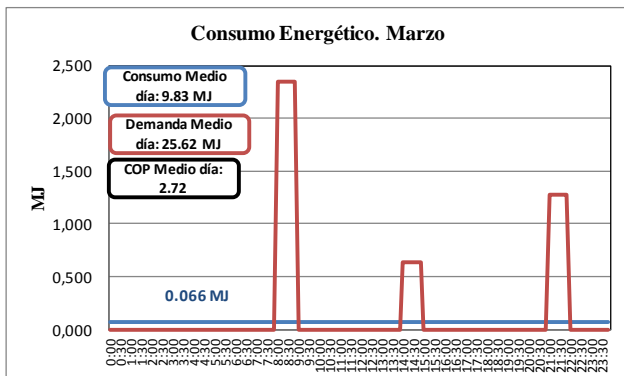


Ilustración 110 Evolución del Consumo y la Demanda Energética durante día medio representativo. Marzo-Abril.

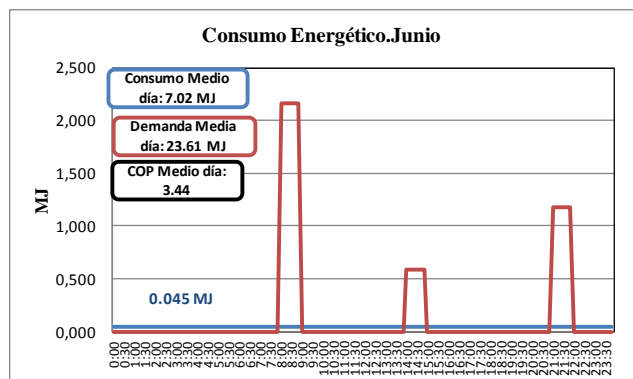
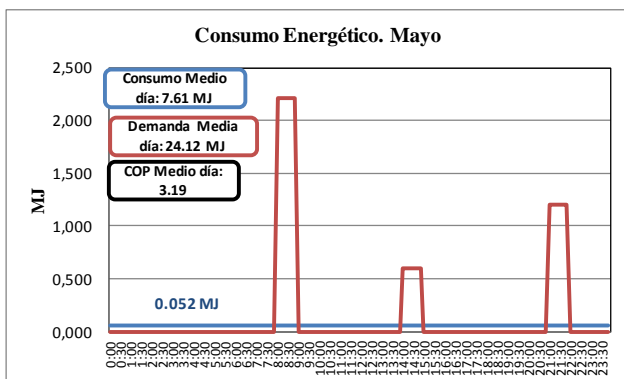


Ilustración 111 Evolución del Consumo y la Demanda Energética durante día medio representativo Mayo-Junio.

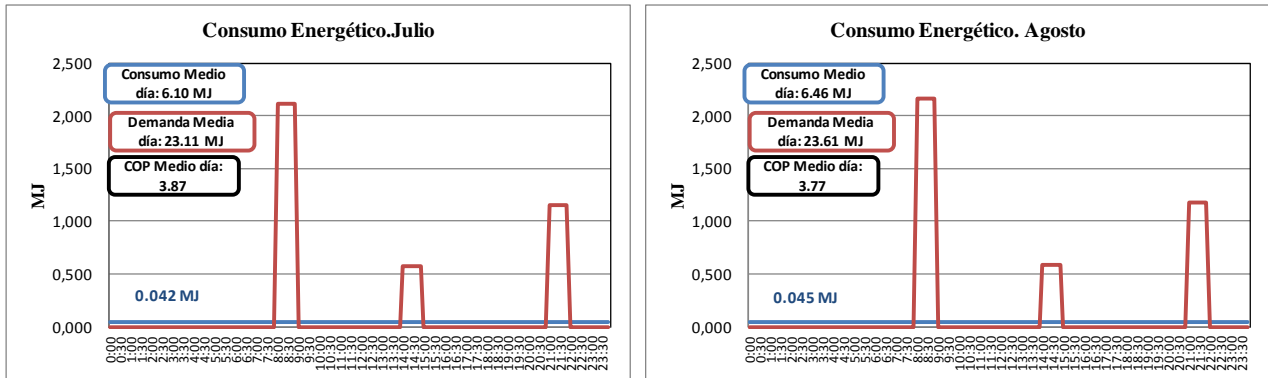


Ilustración 112 Evolución del Consumo y la Demanda Energética durante día medio representativo. Julio-Agosto.

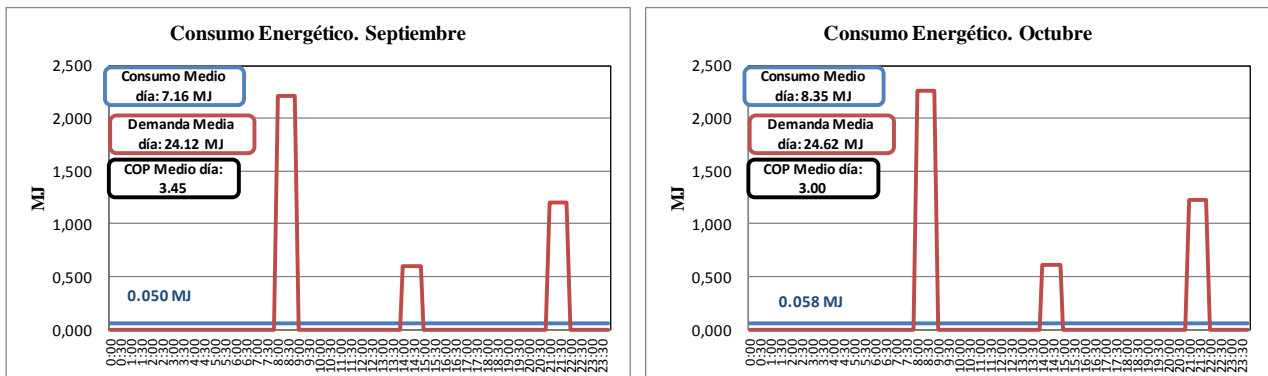


Ilustración 113 Evolución del Consumo y la Demanda Energética durante día medio representativo. Sept.-Agosto.

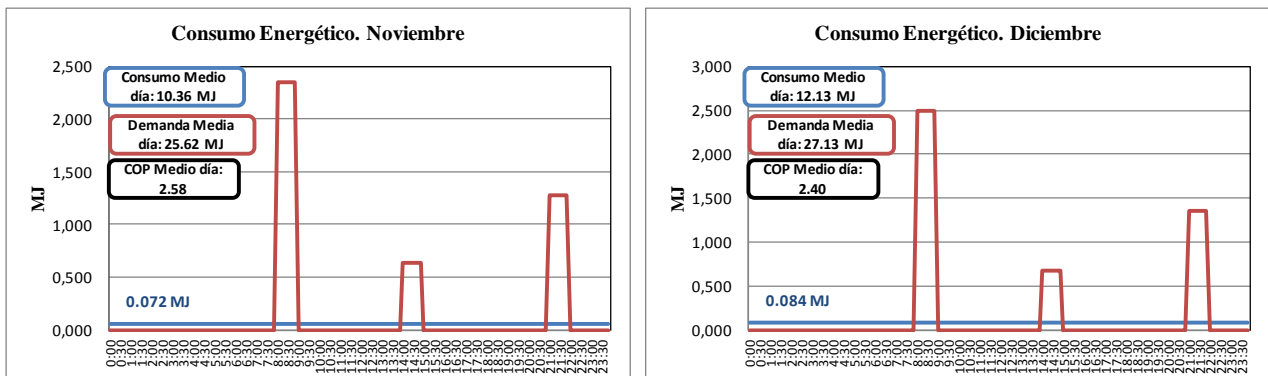


Ilustración 114 Evolución del Consumo y la Demanda Energética durante día medio representativo. Nov.-Dic.

La diferencia radica en la magnitud de las variables:

- La **demanda energética media diaria es menor en los meses centrales del año** debido a que las necesidades de agua caliente son menores en los meses con temperaturas más altas que en el resto del año.
- Debido a que durante los meses centrales del año la temperatura ambiente es mayor, se obtiene una temperatura de la placa mayor. Esto conlleva a tener **valores del coeficiente de operación mayores en los meses centrales** que en el resto del año, de modo que la relación consumo/demanda se vuelve más pequeña.



- La suma de los dos efectos, valores de demanda energética menores y de coeficiente de operación mayores en los meses centrales, nos lleva a tener **valores de consumo energético diario menores en los meses centrales que durante el resto del año.**

Estas conclusiones se pueden observar a simple vista en la siguiente gráfica, en la que se comparan los valores medios diarios del consumo energético, la demanda energética y el coeficiente de operación:

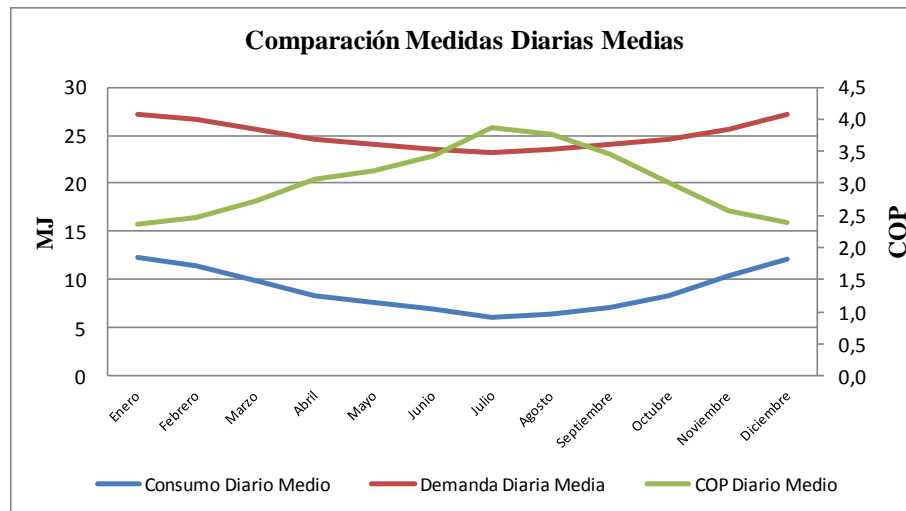


Ilustración 115 Relación de magnitudes medias diarias: consumo energético, demanda energética y COP.

El consumo y la demanda energética tienen un comportamiento paralelo ya que son magnitudes proporcionales.

En cambio, el coeficiente de operación tiene un comportamiento opuesto al consumo y la demanda. Valores bajos de COP implican una relación consumo/demanda más alta, de modo que el consumo energético representa una proporción mayor de la demanda. Por el contrario, cuando va aumentando el coeficiente de operación, la relación consumo/demanda disminuye y por tanto, el consumo es menor.

5. COLECTORES SOLARES TÉRMICOS PLANOS.

5.1. INTRODUCCIÓN A LOS COLECTORES SOLARES PLANOS.

A continuación vamos a centrarnos en otro tipo de paneles, los colectores solares planos que constituyen el tipo de colector más utilizado en instalaciones de agua caliente sanitaria.

En este apartado, no se pretende realizar un análisis tan exhaustivo como en el apartado de paneles solares termodinámicos. El objetivo es realizar una descripción general de este tipo de colectores y obtener unas medidas de consumo energético con las que poder comparar ambos tipos de paneles.

Para obtener las medidas de consumo energético en instalaciones con paneles solares planos utilizaremos el método de F-Chart, que describiremos detalladamente.

5.2. ESQUEMA DE INSTALACIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA CON PANELES SOLARES PLANOS.

Vamos a comenzar describiendo tanto el funcionamiento como el esquema básico de una instalación de agua caliente sanitaria con paneles solares planos. En el siguiente esquema se representa este tipo de instalación, compuesta por un circuito primario y otro secundario.

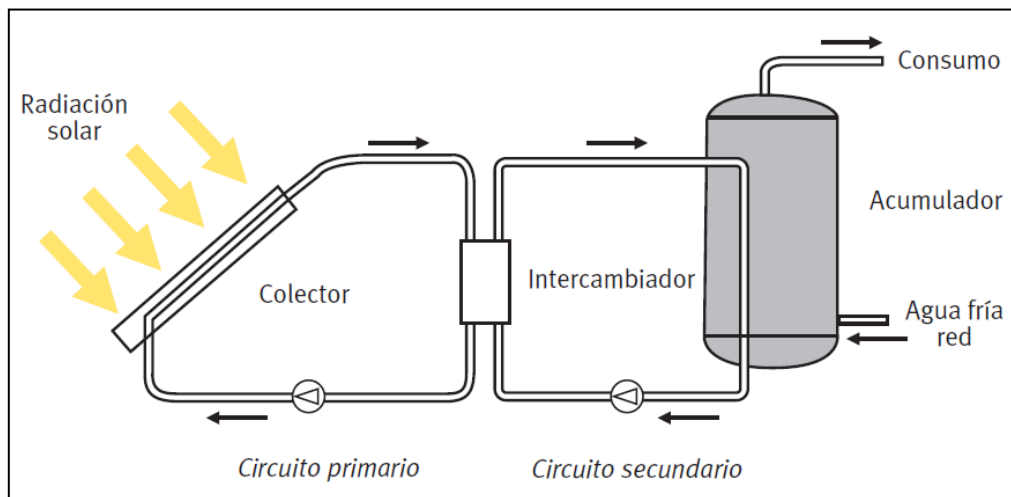


Ilustración 116 Esquema básico de una instalación solar de baja temperatura con aplicación de agua caliente sanitaria. Fuente: "Energía Solar Térmica" del IDAE.



5.2.1. Funcionamiento de la Instalación.

El principio de funcionamiento de cualquier instalación solar térmica es el de aprovechar la energía del Sol mediante un conjunto de captadores y transferirla a un sistema de almacenamiento, que abastece el consumo cuando sea necesario.

El colector posee en su interior una cubierta de color negro, con el fin de absorber la mayor cantidad de la energía emitida por el sol. El cuerpo negro se calienta y cede el calor al agua, quedando parte de la radiación atrapada dentro del colector produciendo un calentamiento por efecto invernadero.

Una vez que el fluido que circula en el interior del captador se calienta, hay que evitar su enfriamiento a través de un aislamiento térmico lo más eficaz posible. Lo más habitual es mantener el calor de una masa de agua por medio de un tanque de almacenamiento bien aislado.

Los depósitos de almacenamiento terminan por perder la energía térmica conseguida a lo largo del tiempo, por lo que el funcionamiento de nuestra instalación estará condicionado por la cantidad de radiación solar que llega hasta el captador y por la demanda energética de cada momento. Generalmente se dimensiona para que la acumulación solar sea la demandada por los usuarios en un día.

Para evitar posibles restricciones energéticas en aquellos periodos en los que no hay suficiente radiación o el consumo es superior a lo previsto, casi todos los sistemas de energía solar térmica cuentan con un aporte de energía extraordinario. En estas ocasiones, entrará automáticamente en funcionamiento un sistema de calentamiento auxiliar que permite compensar el déficit existente. Este sistema de apoyo utilizará los medios energéticos convencionales, como el gas, la electricidad o el gasóleo.

En la actualidad, una instalación de energía solar cubre del 50% al 80% del total de la demanda de agua caliente sanitaria de una vivienda, aunque en zonas de gran soleamiento a lo largo del año, como el sur de España, el porcentaje de aporte puede ser superior. El resto se suple con un sistema de apoyo energético.

La razón por la que las instalaciones solares no se diseñan para cubrir el 100% del consumo es porque, de hacerse así, sería necesario instalar costosos sistemas de acumulación de energía a largo plazo que harían económicamente inviable este tipo de equipos.



5.2.2. Elementos Principales de una Instalación de ACS con paneles solares planos.

Describimos a continuación los principales elementos que componen una instalación de agua caliente sanitaria con paneles solares planos.

5.2.2.1. Captadores Solares Planos

Se han diseñado distintas y avanzadas versiones de captadores solares térmicos con el objetivo de incrementar la cantidad de energía absorbida y disminuir las pérdidas. Aunque los más comunes son los **captadores planos**, que utilizan como fluido el agua, en la actualidad también se comercializan otros tipos de captadores como los **captadores solares de vacío**, que consiguen temperaturas más elevadas de funcionamiento, y los **captadores solares de aire**, que se utilizan fundamentalmente en los climas fríos para calentar el espacio.

Vamos a detallar alguna de las características de los captadores solares más empleados hoy en día, y que forman parte de nuestro estudio, los **captadores solares planos**.



Ilustración 117 Colectores o Paneles Solares Planos.

Los captadores solares planos se utilizan convencionalmente en aplicaciones domésticas, y trabajan con temperaturas que no sobrepasan los 100 °C de temperatura.

El principio de funcionamiento del captador plano se basa en una trampa de calor que conjuga el efecto de cuerpo negro con el efecto invernadero. Gracias a este sistema de captación se consigue absorber la mayor parte de la radiación solar que llega hasta la superficie y devolver la menos posible.

Los captadores planos, destinados por lo general a la producción de agua caliente sanitaria, están recubiertos de una caja herméticamente cerrada. En la cara superior de la caja se coloca una **superficie acristalada** que deja atravesar la radiación solar e impide que se pierda la ganancia térmica obtenida. Generalmente la **carcasa** que envuelve al equipo de captación es metálica, aunque en algunos casos puede ser de plástico especial o de algún otro material.

En el interior del sistema captador se encuentra la **placa absorbidora**, dónde se realiza la captación de la radiación solar propiamente dicha. Fabricada con materiales que conducen bien

el calor (aluminio, cobre, planchas metálicas...), esta placa tiene una disposición de tubos que cuentan con una toma por donde entra el fluido a calentar y otra de salida.

Pese a que existen un gran número de diferentes configuraciones de tubos internos, los tradicionales suelen utilizar los de tipo serpentina o los de tubo paralelo. Estos consisten en varios tubos de cobre, orientados en forma vertical con respecto al captador, en contacto con una placa de color oscuro que transfiere el calor al fluido circulante. El contacto entre la placa absorbidora y el tubo por donde circula el fluido no tiene porqué ser un elemento crítico del captador siempre que esté bien sellado con cualquiera de las técnicas de soldadura existentes en el mercado.

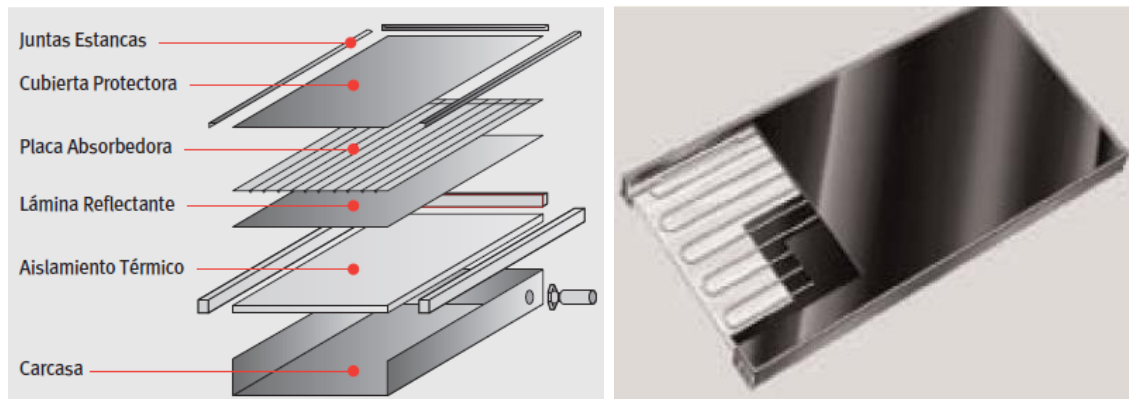


Ilustración 118 Captador de tubos paralelo (Izquierda) y Captador de Serpentin (Derecha).

Las dimensiones de los captadores solares son muy diversas y van desde los 0.5 m^2 hasta los 8 m^2 , siendo la medida más habitual en torno a los 2 m^2 .

La eficiencia de los captadores solares vendrá definida por su **curva de rendimiento**, que permite saber cuál es la cantidad de energía que podremos aprovechar en cada situación. Existe una normativa oficial para la homologación de estos equipos en la que se evalúa la curva característica de los diferentes modelos. Esta valoración se realiza sobre captadores nuevos, y de forma puntual, no siendo representativa del comportamiento del captador a lo largo de su vida útil, ya que su eficacia podrá evolucionar de diferente manera con el paso del tiempo y en función de su uso y mantenimiento.

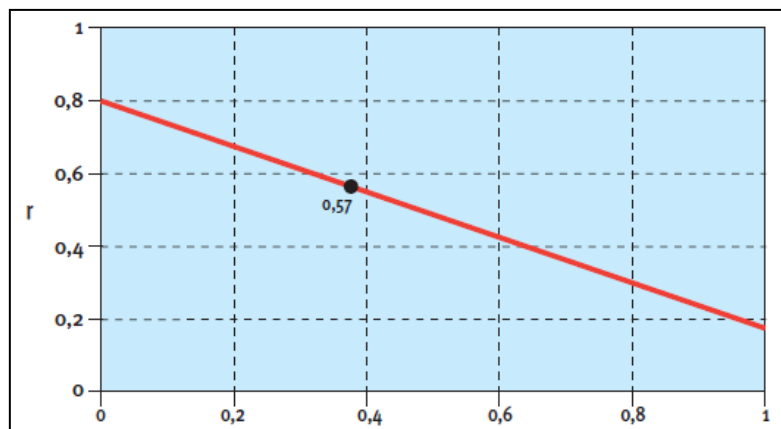


Ilustración 119 Curva de Rendimiento de un Captador Solar (Fuente: "Energía Solar Térmica" del IDAE).



La gráfica muestra la **curva de rendimiento o curva característica de un captador plano** general. Esta curva de rendimiento tiene la expresión general dada por:

$$r = \eta = a - b \cdot T$$

Donde:

- **r** o **η** es el rendimiento o eficiencia del captador. Un mayor valor de r supone un captador de mejores prestaciones.
- **a** es un parámetro característico del captador, llamado eficiencia óptica, determinado por el punto de corte con el eje Y. Valores mayores suponen una mayor ganancia solar del captador.
- **b** es un parámetro característico del captador, que determina las pérdidas por radiación y convección, definido como la pendiente de la curva. Valores menores suponen menores pérdidas de la energía captada.
- **T** es un parámetro variable que representa las condiciones ambientales y de trabajo del captador. Se define como proporcional a la diferencia entre la temperatura de entrada del fluido y la temperatura ambiente, dividida entre la irradiancia.

Los captadores solares se ensayan generalmente siguiendo un procedimiento que consiste en hacerlos funcionar en un banco de pruebas bajo unas condiciones estables de radiación solar, velocidad del viento, caudal del fluido, temperaturas del fluido a la entrada, a la salida y ambiente, durante un periodo de tiempo en el que la temperatura de salida del fluido y la energía útil extraída no varíen sensiblemente.

La **energía útil extraída** viene dada por la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_u = \dot{m} \cdot A_c \cdot c_p \cdot (T_e - T_s)$$

Donde:

- \dot{Q}_u es la potencia útil extraída del captador (vatios, W);
- \dot{m} es el caudal másico de fluido por unidad de superficie captadora ($kg/m^2 \cdot s$);
- c_p es el calor específico a presión constante del fluido ($J/kg \cdot K$);
- T_e es la temperatura de entrada del fluido caloportador al captador;
- T_s es la temperatura de salida del fluido caloportador del captador.

Además, la energía útil del captador en un instante dado, también viene dada por una ecuación que se denomina **ecuación característica o ecuación de Bliss**, que muestra la diferencia entre la energía absorbida por la placa absorbente y la energía perdida por conducción y convección del captador:

$$\dot{Q}_u = F_R \cdot A_c \cdot (I_t \cdot (\tau \cdot \alpha) - U_L \cdot (T_e - T_a))$$

Donde:

- F_R es el factor de eficacia de intercambio de calor entre la placa absorbente y el fluido (adimensional)
- A_c es el área de la superficie del captador (m^2);



- I_t es la radiación incidente sobre la superficie del captador por unidad de área (W/m^2);
- τ es la transmitancia de las cubiertas transparentes;
- α es la absorptancia de la placa absorbente;
- U_L es el coeficiente global de pérdidas del captador ($\text{W}/\text{K}\cdot\text{m}^2$);
- T_a es la temperatura ambiente en el exterior.

Los resultados de las pruebas de los captadores se ofrecen como expresión de la **eficacia del captador** (η), definida por la relación de la energía captada y la recibida en un instante dado:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_c \cdot I_t}$$

Podemos obtener la ecuación característica del captador, utilizando la anterior expresión de la eficacia del captador junto con la **ecuación de Bliss**. Sustituyendo la ecuación de Bliss de la potencia útil, en la expresión de la eficacia del captador:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_c \cdot I_t} = \frac{F_R \cdot A_c \cdot (I_t \cdot (\tau \cdot \alpha) - U_L \cdot (T_e - T_a))}{A_c \cdot I_t}$$

Eliminando y agrupando términos llegamos a la siguiente expresión:

$$\eta = F_R \cdot (\tau \cdot \alpha) - \frac{F_R \cdot U_L \cdot (T_e - T_a)}{I_t}$$

Pero es necesario tener en cuenta lo siguiente. Los ensayos de los captadores se realizan en días claros en el exterior, cerca del mediodía solar, o bien en el interior, utilizando un simulador solar. En ambos casos, la componente difusa de la radiación solar es pequeña y la incidencia de la radiación es próxima a la normal. Por tanto, el producto transmitancia-absorptancia obtenido de la prueba del captador corresponde a la radiación directa con incidencia normal. El producto transmitancia-absorptancia, $(\tau \cdot \alpha)$ se escribe entonces como $(\tau \cdot \alpha)_n$.

De este modo la anterior ecuación cambia, siendo la siguiente expresión la que determina la **curva característica de un captador solar plano**:

$$\eta = a - b \cdot T = F_R \cdot (\tau \cdot \alpha)_n - F_R \cdot U_L \frac{(T_e - T_a)}{I_t}$$

A partir de esta ecuación, los resultados de la prueba del captador se pueden presentar mediante una gráfica de la eficacia instantánea del captador en función del término $\frac{(T_e - T_a)}{I_t}$.

Para un caudal determinado, suponiendo $(\tau \cdot \alpha)_n$ y U_L constantes, la ecuación es sensiblemente una recta en la que:

- $F_R \cdot (\tau \cdot \alpha)_n$ es la ordenada en el origen (adimensional);
- $F_R \cdot U_L$ es la pendiente de la recta ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$).

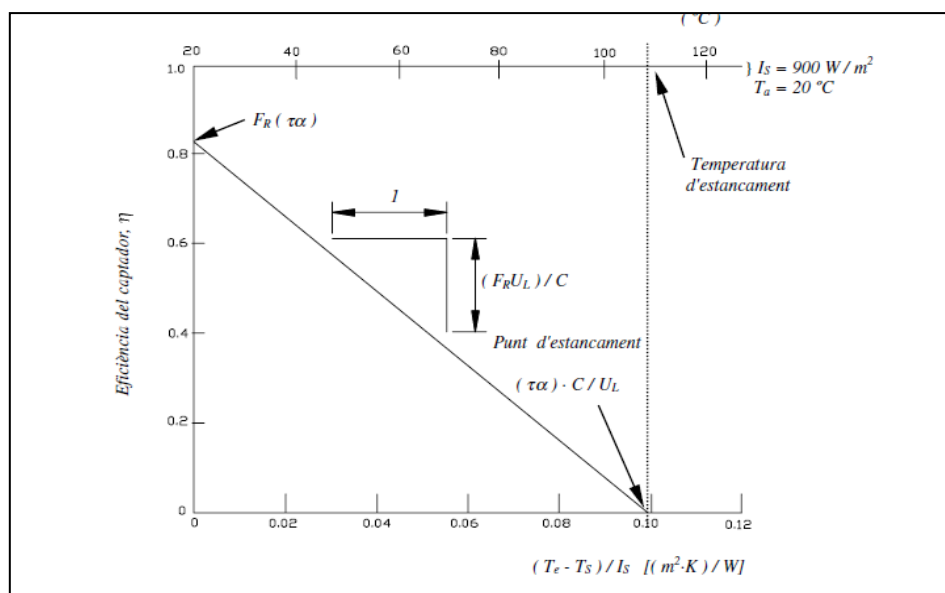


Ilustración 120 Curva de eficiencia instantánea para un captador plano (Energía Solar Térmica. Martí Rosas Casals).

Estas curvas características han de ser facilitadas por el fabricante y de su estudio puede deducirse la calidad de un captador desde el punto de vista térmico.

Un captador será tanto mejor cuanto mayor sea el valor de su ordenada en el origen $F_R \cdot (\tau \cdot \alpha)_n$ y menor el de la pendiente $F_R \cdot U_L$, ya que entonces la diferencia entre ambos términos se hará mayor, y por tanto aumentará la eficiencia instantánea del captador.

5.2.2.2. Sistema de Distribución.

El sistema de distribución es el que se encarga de transportar el fluido caliente contenido en los captadores solares hasta el punto de consumo. Existen diferentes circuitos de distribución, dependiendo de las necesidades que pretendamos satisfacer o las condiciones climáticas del lugar donde vamos a realizar la captación.

Se pueden diferenciar los siguientes:

- **Instalaciones de circuito abierto:** transfieren directamente el agua caliente producida en el captador solar hacia el depósito de acumulación. Cuando el captador es calentado por el Sol, el agua aumenta de temperatura desplazándose hacia arriba. Una vez en el depósito de almacenamiento, éste se vacía con una cantidad equivalente de agua más fría que se dirige al captador.

Su principal ventaja es que resultan más económicos, más sencillos de fabricar, de instalar e incluso se obtienen mejores rendimientos energéticos. Por el contrario, el principal inconveniente es que al usar como único fluido de circulación el agua se corre el riesgo de rotura en periodos de heladas o la posibilidad de graves problemas de incrustaciones por la calidad de las aguas.

Para evitar este tipo de problemas, en el caso de las obstrucciones en el sistema de captación habrá que utilizar ciertos aditivos o dispositivos electrónicos. Por su parte,

antes las heladas estacionales será necesario vaciar el circuito durante la época más fría del año, ya que el volumen del hielo es mayor que el del agua líquida y puede llegar a producir daños importantes en el equipo. Por este motivo, las instalaciones de circuito abierto son empleadas en lugares donde no se dan heladas a lo largo del año o bien en aplicaciones temporales (establecimientos de hostelería de temporada, piscinas descubiertas, etc.).

- **Instalaciones de Circuito Cerrado:** en este caso existen dos circuitos, el circuito primario del sistema captador y el circuito secundario donde se encuentra el sistema de almacenamiento. En el circuito primario se introduce un líquido especial que circula por dentro del captador y transmite calor al agua del tanque de almacenamiento por medio de un intercambiador de calor. Lo que se pretende con el sistema de doble circuito es evitar que el agua del depósito se pueda mezclar con el líquido del captador. Así, es posible colocar un componente anticongelante que permita su uso en zonas donde las temperaturas bajen de cero grados.

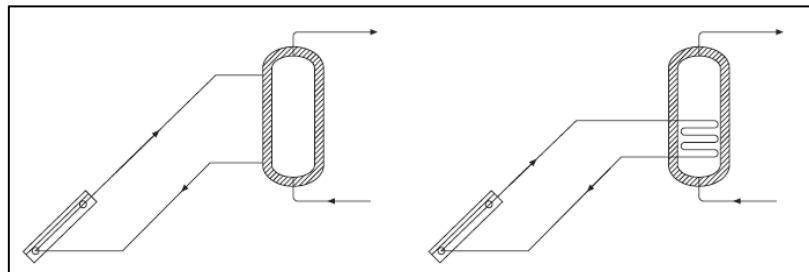


Ilustración 121 Instalación de Circuito Abierto (Izquierda) y Circuito Cerrado (Derecha). "Energía Solar Térmica".

- **Instalación con circulación forzada de agua:** están basados en una bomba de impulsión movida por un aporte exterior de energía eléctrica. La bomba de circulación colocada en el sistema de captación tiene como principal función transferir el fluido circulante más rápidamente, impidiendo así que se pueda perder parte de las calorías ganadas en el proceso de distribución.
- **Instalación con circulación natural:** tienen la ventaja de no contar con bombas de impulsión, aprovechando la circulación natural del agua caliente, que por naturaleza tiende a ascender. Se utilizan en instalaciones solares pequeñas.

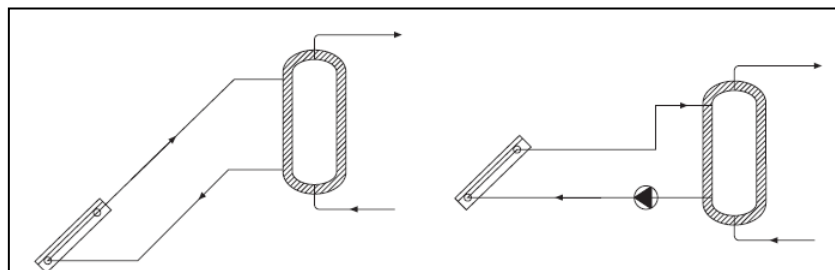


Ilustración 122 Instalación con Circulación Natural (Izquierda) y Circulación Forzada (Derecha). "Energía Solar Térmica".

5.2.2.3. Tanque de Almacenamiento.



La energía que se recibe del Sol no siempre coincide con las épocas de mayor consumo. Por eso es necesario acumular la energía en aquellos momentos del día que más radiación existe, para utilizarla posteriormente cuando se produzca la demanda.

Lo habitual es almacenar la energía en forma de calor en depósitos espacialmente diseñados para este fin. En general, darán mejores resultados depósitos con forma cilíndrica, en proporciones de uno de ancho por dos de alto. Esto se debe al **fenómeno de estratificación** por el que el agua caliente disminuye su densidad y tiende a ascender por encima del agua fría, que pesa más. Cuanto mayor sea la altura del depósito, mayor será también la diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior del tanque de almacenamiento.

Existen muchos tipos de depósitos para agua caliente en el mercado, siendo los materiales de construcción más adecuados el acero, el acero inoxidable, el aluminio y la fibra de vidrio reforzado. La adecuada elección del material de construcción tiene especial importancia porque uno de los mayores problemas de las instalaciones solares es la calidad del agua, que puede producir **corrosiones en el tanque de almacenamiento**. En general, no es aconsejable construir una instalación solar con dos materiales de distinta naturaleza, ya que se favorece la creación de pares galvánicos, y con ello, la corrosión, que puede prevenirse mediante ánodos de sacrificio que deben ser cambiados periódicamente.

5.2.2.4. Sistema de Apoyo Energético.

El sistema de energía auxiliar es un elemento imprescindible en toda instalación solar si no se quieren sufrir restricciones energéticas en aquellos periodos en los que no hay suficiente radiación o el consumo es superior a lo previsto.

Algunos sistemas de apoyo son:

- **Eléctricos**, sobre todo para equipos pequeños, en los que la energía se suministra dentro del acumulador mediante una resistencia.
- **Calderas de Gas o Gasóleo**. Este tipo de apoyos, según el diseño de la instalación, pueden provenir de modificaciones de las instalaciones preexistentes o bien realizarse de modo simultáneo a la instalación solar.

En cualquier caso, siempre será necesario que exista un mecanismo de control adecuado que minimice la entrada en funcionamiento del sistema de energía de apoyo, basado en un conjunto de sondas y válvulas automáticas, que en función de la temperatura del acumulador solar, de la temperatura del acumulador auxiliar si lo hubiera, y de la temperatura de uso activarán el sistema auxiliar o no.



5.3. CÁLCULOS.

Vamos a calcular el consumo eléctrico de la instalación con colectores solares térmicos.

En una instalación con colectores solares térmicos la mayor parte de la demanda energética se cubre directamente con la energía procedente del Sol. Lo que no puede ser cubierto con el Sol, se completa mediante un sistema auxiliar de energía, que nos dará el consumo de la instalación.

Debemos de introducir el concepto de **fracción o cobertura solar “f”**, como el cociente entre la cantidad de energía solar obtenida a través de nuestro sistema de energía solar y el total de la energía requerida. En nuestro caso, el total de la energía requerida viene dado por la **demanda energética** que debemos satisfacer para la obtención de agua caliente sanitaria, siendo el **calor útil** la cantidad de energía solar obtenida con nuestro sistema de energía solar.

Según esto, podemos definir la **fracción o cobertura solar** como:

$$f = \frac{Q_u}{D_{acs}}$$

La energía que podemos cubrir con nuestro sistema de energía solar se define como el **calor útil, Q_u** , dado por la expresión:

$$Q_u = f \cdot D_{acs}$$

La parte de la demanda energética que no podemos cubrir con nuestro sistema de energía solar, debe ser cubierta con un sistema auxiliar de energía, que en nuestro caso será eléctrico, y que determinará el **consumo energético de la máquina W_e** :

$$D_{acs} = Q_u + W_e \Rightarrow D_{acs} = f \cdot D_{acs} + W_e$$

$$W_e = (1 - f) \cdot D_{acs}$$

De este modo, una vez conocidos los valores de demanda energética, debemos calcular el valor de la fracción o cobertura solar de nuestro sistema.

5.3.1. Fracción o Cobertura Solar.

El primer paso a la hora de calcular el consumo energético de la instalación solar es la obtención del valor de fracción solar.

La fracción o cobertura solar es un parámetro que depende de la radiación solar, de la demanda y del sistema auxiliar de energía. En función de estas variables, podremos obtener un valor de **fracción solar mínimo** que nuestra instalación deberá de satisfacer.

Una vez conocido este valor mínimo de fracción solar, procederemos a calcular los parámetros necesarios que nuestra instalación debe tener para cumplir este valor mínimo, mediante el **método de las curvas o método F-Chart**.



5.3.1.1. Cálculo de la Fracción Solar Mínima.

El primer paso es conocer es el valor mínimo de energía que debemos cubrir con nuestro sistema solar, es decir, la cobertura solar.

La **contribución solar mínima**, según el Código Técnico de Edificación, es la fracción dada por el cociente entre los valores anuales de la energía solar aportada exigida, y la demanda energética anual, obtenidos a partir de los valores mensuales. Es decir, es la cantidad de demanda energética que tienes que cubrir con energía solar.

El Código Técnico de Edificación CTE, nos ofrece un método gráfico de cálculo en función de la demanda de ACS del edificio en estudio y de la zona climática en la que nos encontremos.

Cada zona climática es definida a partir de la cantidad de radiación solar global media diaria anual sobre superficie horizontal que reciben, como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 3.2 Radiación solar global		
Zona climática	MJ/m ²	kWh/m ²
I	$H < 13,7$	$H < 3,8$
II	$13,7 \leq H < 15,1$	$3,8 \leq H < 4,2$
III	$15,1 \leq H < 16,6$	$4,2 \leq H < 4,6$
IV	$16,6 \leq H < 18,0$	$4,6 \leq H < 5,0$
V	$H \geq 18,0$	$H \geq 5,0$

Ilustración 123 Límites de Radiación Solar Global por Zona Climática. Tabla 3.2 del "Documento Básico HE de Ahorro de Energía, Sección HE 4" del Código Técnico de Edificación.

Esta tabla tiene su equivalencia gráfica en el siguiente mapa de zonas climáticas, proporcionado por el Código Técnico de Edificación en su apartado sobre Ahorro Energético (HE 4):

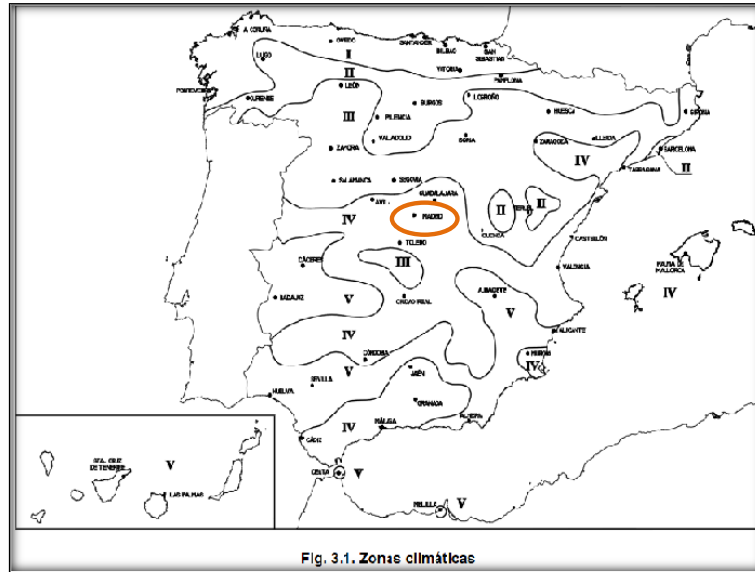


Ilustración 124 Zonas Climáticas. Figura 3.1 del “Documento Básico HE de Ahorro de Energía, Sección HE 4” del Código Técnico de Edificación.

Considerando que nuestro análisis se realiza para una vivienda unifamiliar ubicada en **Madrid**, la zona que vamos a estudiar es la **zona climática IV**.

Además, debemos de conocer la demanda total de agua caliente sanitaria que debemos satisfacer. De cálculos anteriores conocemos que el consumo medio diario de ACS para una temperatura de suministro de 60°C, es de 120 litros al día:

$$C_i(60^\circ\text{C}) = 120 \text{ l ACS} / \text{día} \quad \text{con } i = \text{Enero} \dots \text{Diciembre}$$

Como ya hemos mencionado, la temperatura de 60°C es una temperatura de referencia. Para la temperatura de suministro de 50°C, que es la que usamos, el consumo medio diario de ACS deja de ser constante, y varía en función del mes del año, al tener en cuenta la temperatura de red.

Podemos ver los valores en la siguiente tabla:

	Cacs (60°C) (l/día)	Tred(°C)	Tsum(°C)	Cacs (50°C) (l/día)
ene-10	120	6	50	147,3
feb-10		7		147,9
mar-10		9		149,3
abr-10		11		150,8
may-10		12		151,6
jun-10		13		152,4
jul-10		14		153,3
ago-10		13		152,4
sep-10		12		151,6
oct-10		11		150,8
nov-10		9		149,3
dic-10		6		147,3

Ilustración 125 Variación del Consumo Mensual de Agua Caliente Sanitaria a la temperatura de suministro de 50 °C.



Si hacemos una media de los valores de consumo medio diario de ACS para 50°C, obtenemos un valor de unos 150 l/día. La demanda total de agua caliente sanitaria de nuestra instalación se encuentra entre los **50 y 5.000 litros al día**.

Una vez conocidos tanto la zona climática como la demanda total de ACS, sólo nos queda atender al tipo de fuente de apoyo energética que se va a usar para cubrir la parte no atendida por la contribución solar. Encontramos dos casos:

- i) **Caso general:** la fuente de apoyo puede ser gasóleo, propano, gas natural u otras.

Demanda total de ACS del edificio (l/d)	Contribución solar mínima en %. Caso general				
	Zona climática				
	I	II	III	IV	V
50-5.000	30	30	50	60	70
5.000-6.000	30	30	55	65	70
6.000-7.000	30	35	61	70	70
7.000-8.000	30	45	63	70	70
8.000-9.000	30	52	65	70	70
9.000-10.000	30	55	70	70	70
10.000-12.500	30	65	70	70	70
12.500-15.000	30	70	70	70	70
15.000-17.500	35	70	70	70	70
17.500-20.000	45	70	70	70	70
> 20.000	52	70	70	70	70

Ilustración 126 Contribución Solar Mínima usando una fuente de apoyo no eléctrica. Tabla 2.1 del “Documento Básico HE de Ahorro de Energía, Sección HE 4” del Código Técnico de Edificación.

- ii) **Caso Efecto Joule:** la fuente de apoyo es una fuente eléctrica basada en el calentamiento por Efecto Joule.

Tabla 2.2. Contribución solar mínima en %. Caso Efecto Joule					
Demanda total de ACS del edificio (l/d)	Zona climática				
	I	II	III	IV	V
50-1.000	50	60	70	70	70
1.000-2.000	50	63	70	70	70
2.000-3.000	50	66	70	70	70
3.000-4.000	51	69	70	70	70
4.000-5.000	58	70	70	70	70
5.000-6.000	62	70	70	70	70
> 6.000	70	70	70	70	70

Ilustración 127 Contribución Solar Mínima usando una fuente de apoyo eléctrica. Tabla 2.2 del “Documento Básico HE de Ahorro de Energía, Sección HE 4” del Código Técnico de Edificación.

Vamos a utilizar una **fuente de apoyo eléctrica**. De este modo, sabiendo que tenemos una vivienda unifamiliar en zona IV con una demanda total de ACS de entre 50 y 5.000 l/día, podemos determinar que la **contribución solar mínima anual deberá ser del 70%**.



$$C_{ACS} = 50 - 5.000 \text{ l ACS} / \text{vivienda} \cdot \text{dia} \quad \text{y Madrid} \rightarrow \text{Zona Climática IV}$$

$$f_{anual_min} = 70\% \Rightarrow f_{anual} \geq 70\%$$

Además existen dos condiciones establecidas en el CTE en su sección HE4 (apartado 2.1 Contribución Solar Mínima punto 3) que debemos cumplir mensualmente respecto a la fracción solar:

- En ningún mes del año la energía producida por la instalación podrá superar el 110% de la demanda energética.
- En no más de 3 meses seguidos se podrá superar el 100%.

Esto se puede expresar como:

$$f = \begin{cases} f_{anual} \geq 70\% \\ f_{mes\ i} < 110\% \forall \text{ mes } i \\ f_{mes\ i} > 100\% \text{ en no más de 3 meses seguidos} \end{cases}$$

5.3.2. Cálculo de la Fracción Solar mediante el Método F-Chart.

Una vez hemos obtenido la cobertura solar mínima vamos a utilizar el método F-Chart para obtener el dimensionamiento de la instalación que necesitaremos para cumplir dicho requisito.

Como ya sabemos, la cobertura solar mínima que nuestro sistema solar debe satisfacer es de al menos el 70% anual.

Debemos comenzar suponiendo un valor inicial, tanto del **área de colectores** como del **volumen de agua del tanque de acumulación**, con los que poder operar. A partir de estos, obtendremos los parámetros X e Y característicos del método F-Chart, y que nos permitirán obtener la fracción solar que cubriremos cada mes del año.

Una vez calculadas las fracciones solares de cada mes, podremos calcular la fracción solar anual que deberá de cumplir el requisito de la cobertura solar mínima, para que los valores de área de colectores y volumen de acumulador sean aceptables.

Este sería el diagrama que se sigue en el método F-Chart:

$$\begin{cases} A_0 \\ V_0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Y \\ X \end{cases} \Rightarrow f_{mes\ i} \Rightarrow f_{anual} \leq 70\% \Rightarrow \begin{cases} A_{colectores} \\ V_{acumulador} \end{cases}$$

Pero primero es necesario explicar más en profundidad el método de las curvas o F-Chart.



5.3.2.1. Análisis Teórico del Método F-Chart.

Introducción el método F-Chart

El método “F-Chart” o método de las curvas-f, es un método que permite estimar la aportación energética de un sistema solar en periodos de tiempo relativamente largos.

Este método permite realizar el cálculo de la cobertura de un sistema solar, es decir, permite calcular la contribución a la aportación del calor total necesario para combatir las cargas térmicas, así como el rendimiento medio en un largo periodo de tiempo.

Fue desarrollado en 1973 por los profesores W.A.Beckman, S.A.Klein, y J.A.Duffie en el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de Madison en Wisconsin. En las instalaciones solares, los parámetros que influyen en el rendimiento del captador son muy variables, y suponer unas condiciones medias de funcionamiento supone asumir un riesgo elevado.

Mediante la simulación de numerosas instalaciones, a través de la herramienta informática TRNSYS (Transient Energy System Simulation Tool) diseñada para simular el funcionamiento transitorio de sistemas térmicos de energía, y el posterior estudio de resultados se concluyó que, a pesar de que las condiciones y por tanto el rendimiento de los captadores era variable, el aporte energético de la instalación en periodos largos de tiempo, como un mes, seguía una determinada correlación dependiente de dos parámetros adimensionales.

Es por esto, que este método es un proceso de cálculo suficientemente exacto para largas estimaciones y no ha de aplicarse a estimaciones de tipo semanal y mucho menos de tipo diario.

Para desarrollarlo se utilizan datos medios mensuales meteorológicos, y es perfectamente válido para determinar el rendimiento o factor de cobertura solar en instalaciones de calentamiento, en todo tipo de edificios, mediante captadores solares planos.

Su aplicación consiste en identificar las variables adimensionales del sistema de calentamiento solar y utilizar la simulación de funcionamiento por ordenador, para dimensionar las correlaciones entre estas variables y el rendimiento medio del sistema para un dilatado periodo de tiempo.

El método f-Chart ha sido desarrollado para tres sistemas de configuraciones estándar: sistemas líquido y de aire para calentamiento de locales y sistemas para suministrar agua caliente únicamente.

En nuestro caso, vamos a interesarnos por la aplicación para sistemas solares con colectores planos de líquido cuya aplicación es el calentamiento de agua, es decir, para agua caliente sanitaria, aunque mostraremos teóricamente las diferencias entre los métodos.

Variables Adimensionales del método F-Chart.

El balance energético global para un periodo mensual en un sistema de calentamiento solar se puede escribir como sigue:

$$I_t - Q_{term} + Q_{aux} = \Delta U$$

Donde,



- I_t es la energía solar útil total obtenida durante un mes.

- Q_{term} es la suma de las cargas de calefacción y agua caliente sanitaria durante un mes.

- Q_{aux} es la energía auxiliar total requerida durante un mes.

- ΔU es el intercambio de energía en la unidad de almacenamiento.

El parámetro ΔU es suficientemente pequeño frente al resto, por lo que para los cálculos se le puede considerar cero, pudiendo escribir:

$$I_t - Q_{term} + Q_{aux} = 0$$

O lo que es lo mismo:

$$Q_{term} - Q_{aux} = I_t$$

De modo que se puede definir el parámetro f , como la fracción de la carga de calentamiento total mensual suministrada por la energía solar:

$$f = \frac{Q_{term} - Q_{aux}}{Q_{term}} = \frac{I_t}{Q_{term}}$$

Sin embargo, no es posible calcular f mediante esta ecuación, ya que la energía solar útil, I_t , es una función complicada de obtener ya que depende de la radiación incidente, la temperatura ambiente y las pérdidas térmicas.

Por ello debemos de encontrar una relación empírica que nos permita obtener el valor de la fracción solar mensual.

El factor f se relaciona empíricamente con dos grupos adimensionales, que variaran en función de la configuración elegida, pero que presentan la siguiente expresión general:

$$X = \frac{A_c \cdot F'_R \cdot U_L \cdot (T_{ref} - T_a) \cdot \Delta t}{Q_{term}}$$

$$Y = \frac{A_c \cdot F'_R \cdot (\bar{\tau} \cdot \bar{\alpha}) \cdot I_t \cdot N_{mes}}{Q_{term}}$$

Donde:

- A_c es el área de colectores (m^2);

- F'_R es el factor de eficacia captador-intercambiador;

- U_L es el coeficiente global de pérdidas del colector ($W/^\circ C \cdot m^2$);

- T_{ref} es la temperatura de referencia fijada en $100^\circ C$;

- T_a es la temperatura ambiente media mensual ($^\circ C$);



$-\Delta t$ es el número total de segundos en un mes;

$-(\bar{\tau} \cdot \bar{\alpha})$ es el producto de la transmitancia y la absortancia media mensual;

$-N_{mes}$ es el número de días del mes.

Cada parámetro adimensional tiene un significado físico:

- **Y** expresa la relación entre la energía absorbida en la superficie de la placa captadora y la carga total de calentamiento durante un mes.
- **X** expresa la relación entre las pérdidas de energía del captador para una temperatura de referencia y la carga total de calentamiento para un mes.

Es posible escribir las ecuaciones de X e Y de una forma diferente por conveniencia de cálculos:

$$X = \frac{A_c \cdot F'_R \cdot U_L \cdot (T_{ref} - T_a) \cdot \Delta t}{Q_{term}} \Rightarrow \frac{X}{A_c} = \frac{\left(\frac{F'_R}{F_R}\right) \cdot F'_R \cdot U_L \cdot (T_{ref} - T_a) \cdot \Delta t}{Q_{term}}$$

$$\frac{X}{A_c} = \frac{F_R \cdot U_L \cdot \left(\frac{F'_R}{F_R}\right) \cdot (T_{ref} - T_a) \cdot \Delta t}{Q_{term}}$$

$$Y = \frac{A_c \cdot F'_R \cdot (\bar{\tau} \cdot \bar{\alpha}) \cdot I_t \cdot N_{mes}}{Q_{term}} \Rightarrow \frac{Y}{A_c} = \frac{\left(\frac{(\bar{\tau} \cdot \bar{\alpha})_n}{(\bar{\tau} \cdot \bar{\alpha})_n}\right) \cdot \left(\frac{F'_R}{F_R}\right) \cdot F'_R \cdot (\bar{\tau} \cdot \bar{\alpha}) \cdot I_t \cdot N_{mes}}{Q_{term}}$$

$$\frac{Y}{A_c} = \frac{F_R \cdot (\bar{\tau} \cdot \bar{\alpha})_n \cdot \left(\frac{F'_R}{F_R}\right) \cdot \left(\frac{(\bar{\tau} \cdot \bar{\alpha})}{(\bar{\tau} \cdot \bar{\alpha})_n}\right) \cdot I_t \cdot N_{mes}}{Q_{term}}$$

Estas son las **variables adimensionales generales** para cualquier sistema solar térmico. En función del tipo de colector, estos parámetros variaran en alguno de sus componentes.

Se pueden diferenciar tres modelos de ecuaciones en función del tipo de sistema solar utilizado:

- Sistemas Solares con Colectores Planos de Líquido.
- Sistemas Solares para el calentamiento de Agua Caliente Sanitaria.
- Sistemas Solares con Colectores Planos de Aire.

Nuestro sistema solar utilizado es un sistema con colectores planos de líquido cuya aplicación es el suministro de agua caliente sanitaria. Vamos a desarrollar el modelo de ecuaciones de este tipo de sistema solar.



Modelo de Ecuaciones del método F-Chart para Sistemas Solares con Colectores Planos de Líquido y aplicación a Agua Caliente Sanitaria.

Para determinar la fracción f de la carga térmica mensual aportada por la energía solar, es necesario calcular los valores de X e Y para el colector y la carga térmica en cuestión. Esto se realiza para cada mes del año, o para los meses de utilización del sistema solar.

Para un mes la contribución solar se obtiene como el producto de f por la carga térmica correspondiente a dicho mes. La fracción F de la carga de calentamiento anual, aportada por la energía solar, se obtiene como la suma de contribuciones solares mensuales divididas por la carga anual.

El método F-CHART para sistemas solares con colectores planos de líquido, establece la siguiente expresión para calcular la **fracción solar mensual**:

$$f_{mes i} = 1.029 \cdot Y - 0.065 \cdot X - 0.245 \cdot Y^2 + 0.0018 \cdot X^2 + 0.0215 \cdot Y^3$$

Para unos valores X e Y comprendidos entre:

$$0 \leq Y \leq 3 \text{ y } 0 \leq X \leq 18$$

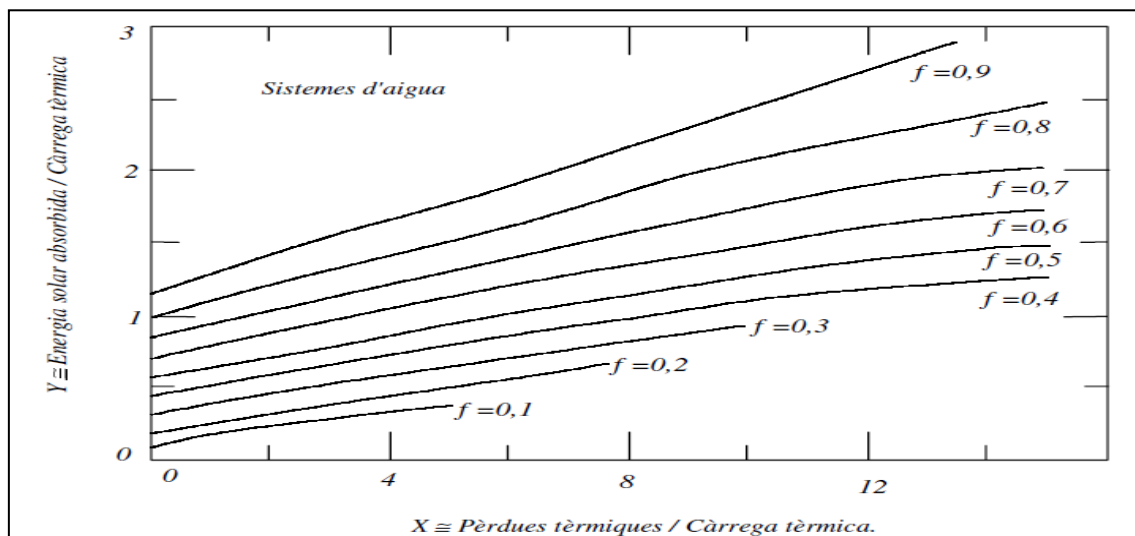


Ilustración 128 Representación de las curvas de fracción solar en función de los parámetros X e Y del Método F-Chart.

Para generar el método de las curvas f , se mantuvieron con valores fijos tres parámetros del sistema de cálculo:

- El caudal volumétrico de fluido por unidad de superficie captadora en el circuito primario o de los colectores solares.
- La capacidad de almacenamiento por unidad de superficie captadora.
- La potencia térmica de la unidad terminal con relación al tamaño de la carga de calefacción.



A continuación, vamos a mostrar las **variables adimensionales específicas** que definen la fracción solar mínima para sistemas solares con colectores planos de líquido.

▪ **Parámetro Y**

Expresa la relación entre la energía absorbida por la placa del captador plano y la carga calorífica total de calentamiento durante un mes.

$$Y = \frac{\text{Energía absorbida por el captador}}{\text{carga calorífica mensual}} = \frac{E_a(MJ)}{D_{ACS}(MJ)}$$

Donde la **energía absorbida** por el captador viene dada por la expresión:

$$E_a = S_c \cdot F_r'(\tau\alpha) \cdot I_t \cdot N$$

Siendo cada termino de ecuación:

- S_c es la superficie de captadores(m²),
- I_t es la radiación diaria mensual incidente sobre la superficie de captación por unidad de área.
- N es el número de días del mes.
- $F_r'(\tau\alpha)$ es un Factor adimensional, que viene dado por la siguiente expresión:

$$F_r'(\tau\alpha) = F_r(\tau\alpha)_n \cdot \left[\frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} \right] \cdot (F_r'/F_r)$$

Donde:

- $F_r(\tau\alpha)_n$ es el Factor de eficiencia óptica del captador, es decir, la ordenada en el origen de la curva característica del captador.
- $\left[\frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} \right]$ es un Modificador del ángulo de incidencia. En general se puede tomar como constante: 0,96 (superficie transparente sencilla) o 0,94 (superficie transparente doble).
- F_r'/F_r es el Factor de corrección del conjunto captador-intercambiador. Se recomienda tomar el valor de 0,95.

▪ **Parámetro X**

Expresa la relación entre las pérdidas de energía en el captador, para una determinada temperatura y la carga calorífica de calentamiento durante un mes:

$$X = \frac{\text{Energía perdida por el captador}}{\text{carga calorífica mensual}} = \frac{E_p(MJ)}{D_{ACS}(MJ)}$$

La **energía perdida** por el captador viene definida mediante la siguiente expresión:



$$E_p = S_c \cdot F_r' U_L \cdot (100 - t_a) \cdot \Delta t \cdot K_1 \cdot K_2$$

Donde cada término de la ecuación significa:

- S_c es la superficie del captador o captadores (m^2)
- t_a es la Temperatura media mensual del ambiente durante las horas diurnas o de día.
- Δt es el Período de tiempo considerado, en segundos(s).
- El parámetro $F_r' U_L$ se puede calcular como:

$$F_r' U_L = F_r U_L \cdot (F_r' / F_r)$$

Donde,

- $F_r U_L$ es la pendiente de la curva característica del captador (coeficiente global de pérdidas del captador)
- F_r' / F_r es el factor de corrección del conjunto captador-intercambiador definido anteriormente y de valor 0,95.
- **K_1 es el Factor de corrección por almacenamiento:** el método de las curvas f se genera para una capacidad de almacenamiento de 75 litros de agua por metro cuadrado de superficie captadora. Para estimar el rendimiento del sistema con otra capacidad de almacenamiento se debe modificar el grupo adimensional X, por el factor de corrección de almacenamiento K_1 .

Se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$K_1 = \frac{X_c}{X} = \left(\frac{M}{75}\right)^{-0,25} = \left(\frac{kg \text{ de acumulación}}{75 \cdot S_c}\right)^{-0,25}$$

En lugar de utilizar los kilogramos de acumulación podemos utilizar directamente el volumen de acumulación, cambiando de este modo la relación que debe cumplir:

$$K_1 = \frac{X_c}{X} = \left(\frac{M}{75}\right)^{-0,25} = \left(\frac{V_{acumulación}}{75 \cdot S_c}\right)^{-0,25}$$

Donde M es el volumen de agua de almacenamiento en litros de agua por metro cuadrado de superficie captadora.

$$37,5 < M < 300 \Rightarrow 37,5 < \frac{V_{acumulación(litros)}}{S_c (m^2)} < 300$$

- **K_2 es el Factor de corrección para A.C.S.:** cuando la aplicación del sistema solar es el agua caliente sanitaria hay que introducir un nuevo factor de corrección a los anteriores. El rendimiento de los sistemas de calentamiento solar de agua se ve afectado por la temperatura de agua de suministro o de red (T_{red} o $T_{agua fría}$) y la temperatura mínima aceptable de agua caliente (T_{ACS}).

Puesto que $T_{agua fría}$ y T_{ACS} afectan al nivel medio de temperatura de funcionamiento del sistema, y por tanto a las pérdidas del captador, es razonable pensar que el grupo



adimensional X , que físicamente representa las pérdidas de energía del captador, debe redefinirse de forma que incluya el efecto de dichas temperaturas.

Por tanto, el factor K_2 relaciona la temperatura mínima de ACS, la temperatura del agua de red y la temperatura media mensual ambiente, y viene dado por la siguiente expresión:

$$K_2 = \frac{X_c}{X} = \frac{11,6 + 1,18 \cdot T_{ACS} + 3,86 \cdot T_{red} - 2,32 \cdot T_a}{100 - T_a}$$

Donde:

- T_{ACS} es la Temperatura Mínima requerida del A.C.S.
- T_{red} es la Temperatura del agua de red.
- t_a es la Temperatura media mensual del ambiente durante las horas diurnas o de día.

Una vez que hayamos obtenido los parámetros X e Y , aplicando la ecuación inicial podemos calcular la fracción de la carga calorífica mensual aportada por el sistema de energía solar, es decir, la fracción solar, f .

De este modo, la energía útil captada cada mes, Q_u , tendrá el siguiente valor:

$$Q_u = f \cdot Q_a$$

Siendo Q_a la carga calorífica mensual de A.C.S.

Siguiendo el mismo proceso desarrollado para un mes, se operará para todos los meses del año. La relación entre la suma de las coberturas mensuales, Q_u , y la suma de las cargas caloríficas, o necesidades de calor, determinará la cobertura anual del sistema:

$$\text{Cobertura solar anual} = \frac{\sum_{i=1}^{12} Q_{ui}}{\sum_{j=1}^{12} Q_{ai}}$$



5.3.2.2. Cálculo de Fracción Solar Mensual. Dimensionamiento Instalación por el Método F-Chart.

Este va a ser el diagrama que se sigue en el método F-Chart:

$$\left\{ \begin{matrix} A_0 \\ V_0 \end{matrix} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} Y \\ X \end{matrix} \right\} \Rightarrow f_{mes i} \Rightarrow f_{anual} \leq 70\% \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} A_{colectores} \\ V_{acumulador} \end{matrix} \right\}$$

▪ Paso 1: Suposición A_c y V_a .

Al tratarse de una vivienda unifamiliar de 4 personas, tanto el área de captadores como el volumen del acumulador, son relativamente bajos.

Lo normal es suponer un área de colectores de unos **0.5 m² por persona**, que será el valor que tomemos. Con esto podemos calcular el área total que necesitará la vivienda:

$$A_{cp} = A_{c_persona} = 0.5 \text{ m}^2/\text{persona}$$

$$\text{Ocupación} = 4 \text{ personas}/\text{vivienda}$$

$$S_c = A_{cv} = A_{c_vivienda} = A_{c_persona} \cdot \text{Ocupación} = 2 \text{ m}^2/\text{vivienda}$$

A su vez, supondremos un volumen del **depósito de acumulación de 300 litros**, que es el mismo volumen de acumulación que utilizamos en la instalación de agua caliente sanitaria con paneles solares termodinámicos:

$$V_{ac} = 300 \text{ l}$$

▪ Paso 2: Cálculo de los parámetros adimensionales X e Y .

➤ Cálculo parámetro Y

Como ya dijimos, el parámetro Y expresa la relación entre la energía absorbida por la placa del captador plano y la carga calorífica total de calentamiento durante un mes.

$$Y = \frac{E_a(MJ)}{D_{ACS}(MJ)} = \frac{S_c \cdot F_r'(\tau\alpha) \cdot I_t \cdot N}{D_{ACS}}$$

$$0 \leq Y \leq 3$$

Vamos a realizar los cálculos por unidad de área por comodidad de cálculo, de modo que usaremos la expresión:

$$\frac{Y}{A_{cv}} = \frac{E_a(MJ)}{A_{cv}(m^2) \cdot D_{ACS}(MJ)} = \frac{S_c \cdot F_r'(\tau\alpha) \cdot I_t \cdot N}{A_{cv} \cdot D_{ACS}} = \frac{F_r'(\tau\alpha) \cdot I_t \cdot N}{D_{ACS}}$$



- S_c es la superficie de captadores (m^2),
- I_t es la **radiación diaria media característica de cada mes** incidente sobre la superficie de captación por unidad de área ($MJ/dia \cdot m^2$).
- N es el número de días del mes.
- D_{ACS} es la demanda energética mensual (MJ).

- **Cálculo de $F'_r(\tau\alpha)$** : es un factor adimensional dado por la siguiente expresión:

$$F'_r(\tau\alpha) = F_r(\tau\alpha)_n \cdot \left[\frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} \right] \cdot (F'_r/F_r)$$

Dicho factor se obtiene a partir de una serie de parámetros dependientes de las características del captador, y que describimos anteriormente. El resumen de sus valores lo podemos ver en la siguiente tabla:

Parámetro	Significado	Valor
$(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$	Modificador del ángulo de incidencia	0.96 (Superficie Transparente Sencilla)
		0.94 (Superficie Transparente Doble)
F'_r/F_r	Factor de corrección del conjunto captador-intercambiador	0.95
$F_r \cdot (\tau\alpha)_n$	Factor de eficiencia óptica del captador. Ordenada en origen de la curva característica del captador	0,745
$F_r \cdot UL$	Coefficiente Global de Pérdidas del captador . Pendiente de curva característica del captador ($W/m^2 \cdot K$)	3,556

Ilustración 129 Tabla de parámetros característicos del captador solar.

Teniendo en cuenta que se utiliza una **superficie transparente sencilla** (modificador del ángulo de incidencia de valor 0.96), obtenemos el siguiente valor:

$$F'_r(\tau\alpha) = 0.68$$

- **Valores de la radiación diaria media I_t incidente sobre la superficie de captador :**

Los valores de radiación diaria media sobre la superficie de captador se obtienen a partir de los datos iniciales de radiación presentados en el apartado de datos meteorológicos:



2010	I_t (MJ/m ² ·dia)
Enero	10,36
Febrero	13,43
Marzo	18,75
Abril	21,72
Mayo	22,42
Junio	20,82
Julio	24,28
Agosto	24,10
Septiembre	22,87
Octubre	20,67
Noviembre	14,64
Diciembre	11,15

Ilustración 130 Valores mensuales de radiación diaria media sobre la superficie de captadores.

▪ *Valores Mensuales Parámetro Y:*

A continuación, presentamos los valores del parámetro adimensional Y para cada mes del año:

Mes	$Fr' \cdot (\tau \alpha)$	I_t (MJ/m ² ·dia)	N (días)	Dacs a 50°C por vivienda (MJ/mes)	Y/A_c (1/m ²)
Enero	0,68	10,36	31	841,1	0,26
Febrero		13,43	28	745,6	0,34
Marzo		18,75	31	794,4	0,50
Abril		21,72	30	738,6	0,60
Mayo		22,42	31	747,6	0,63
Junio		20,82	30	708,4	0,60
Julio		24,28	31	716,5	0,71
Agosto		24,10	31	732,1	0,69
Septiembre		22,87	30	723,5	0,64
Octubre		20,67	31	763,2	0,57
Noviembre		14,64	30	768,7	0,39
Diciembre		11,15	31	841,1	0,28

Ilustración 131 Valores mensuales del parámetro adimensional Y por unidad de área de colector.

Teniendo en cuenta el valor de área de colectores:



Mes	Ac (m2/vivienda)	Y ([])
Enero	2	0,52
Febrero		0,69
Marzo		0,99
Abril		1,20
Mayo		1,26
Junio		1,20
Julio		1,43
Agosto		1,39
Septiembre		1,29
Octubre		1,14
Noviembre		0,78
Diciembre		0,56

Ilustración 132 Valores mensuales del parámetro adimensional Y.

Comprobamos que los valores del parámetro Y están dentro del intervalo aceptable establecido entre 0 y 3.

➤ Cálculo parámetro X

El parámetro X expresa la relación entre las pérdidas de energía en el captador, para una determinada temperatura y la carga calorífica de calentamiento durante un mes:

$$X = \frac{E_p(MJ)}{D_{ACS}(MJ)} = \frac{S_c \cdot F_r' U_L \cdot (100 - t_a) \cdot \Delta t \cdot K_1 \cdot K_2}{D_{ACS}}$$

$$0 \leq X \leq 18$$

Al igual que hemos hecho con el parámetro Y, vamos a realizar los cálculos por unidad de área por comodidad de cálculo, de modo que usaremos la expresión:

$$\frac{X}{A_{cv}} = \frac{E_p(MJ)}{A_{cv} \cdot D_{ACS}(MJ)} = \frac{F_r' U_L \cdot (100 - t_a) \cdot \Delta t \cdot K_1 \cdot K_2}{D_{ACS}}$$

- S_c es la superficie del captador o captadores (m²)
- t_a es la Temperatura media mensual del ambiente durante las horas diurnas o de día.
- Δt es el Período de tiempo considerado, en segundos(s).



- **Cálculo de $F_r'U_L$:** es un parámetro adimensional dado por la siguiente expresión,

$$F_r'U_L = F_rU_L \cdot (F_r'/F_r)$$

Se obtienen a partir de los parámetros característicos del captador, presentados anteriormente en la siguiente tabla:

Parámetro	Significado	Valor
$(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$	Modificador del ángulo de incidencia	0.96 (Superficie Transparente Sencilla)
		0.94 (Superficie Transparente Doble)
F_r'/F_r	Factor de corrección del conjunto captador-intercambiador	0.95
$F_r \cdot (\tau\alpha)_n$	Factor de eficiencia óptica del captador. Ordenada en origen de la curva característica del captador	0,745
$F_r \cdot U_L$	Coefficiente Global de Pérdidas del captador . Pendiente de curva característica del captador (W/m ² ·K)	3,556

Ilustración 133 Tabla de parámetros característicos del captador solar.

Obtenemos el siguiente valor:

$$F_r'U_L = 3,3782 \text{ W/K} \cdot \text{m}^2$$

- **Cálculo de K_1 y K_2**

El **factor de corrección por almacenamiento K_1** , viene dado por la siguiente expresión:

$$K_1 = \frac{X_c}{X} = \left(\frac{M}{75}\right)^{-0,25} = \left(\frac{V_{\text{acumulación}}}{75 \cdot S_c}\right)^{-0,25}$$

$$37,5 < \frac{V_{\text{acumulación}}(\text{litros})}{S_c (\text{m}^2)} < 300$$

Considerando un volumen de acumulación de 300 litros y un área de colectores de 2 m², obtenemos el siguiente valor constante para todo el año:

Ac (m ²)	V (litros)	V/Ac (l/ m ²)	K1 ([])
2	300	150	0,59

Ilustración 134 Valores de factor de corrección por almacenamiento K_1 .

Comprobamos que el cociente entre el volumen y el área de colectores está dentro de los límites establecidos entre 37,5 y 300 litros/m².

El **factor de corrección para A.C.S K_2** , viene dado por la expresión previamente definida:

$$K_2 = \frac{11,6 + 1,18 \cdot T_{ACS} + 3,86 \cdot T_{red} - 2,32 \cdot T_a}{100 - T_a}$$



Al depender tanto de la temperatura de red como de la temperatura ambiente, este parámetro es diferente para cada mes del año:

Mes	Tacs (°C)	Tred (°C)	Ta (°C)	K2 ([])
Enero	50	6	5,44	0,86
Febrero		7	6,54	0,88
Marzo		9	9,27	0,92
Abril		11	14,38	0,93
Mayo		12	16,51	0,94
Junio		13	21,37	0,91
Julio		14	27,74	0,83
Agosto		13	26,05	0,82
Septiembre		12	21,00	0,86
Octubre		11	13,75	0,94
Noviembre		9	8,21	0,94
Diciembre		6	6,02	0,85

Ilustración 135 Valores mensuales del factor de corrección para agua caliente sanitaria, K₂.

▪ *Valores Mensuales Parámetro X:*

A partir de los cálculos realizados, podemos obtener los valores mensuales del parámetro adimensional X:

Mes	Fr'·UL (W/m ² ·K)	Tref (°C)	Tamb (°C)	Δt(seg) mensual	K1 ([])	K2 ([])	Dacs a 50°C (MJ/mes)	X/Ac (1/m ²)
Enero	3,3782	100	5,4	2.678.400	0,59	0,86	841,1	0,52
Febrero			6,5	2.419.200		0,88	745,6	0,54
Marzo			9,3	2.678.400		0,92	794,4	0,57
Abril			14,4	2.592.000		0,93	738,6	0,56
Mayo			16,5	2.678.400		0,94	747,6	0,57
Junio			21,4	2.592.000		0,91	708,4	0,52
Julio			27,7	2.678.400		0,83	716,5	0,45
Agosto			26,1	2.678.400		0,82	732,1	0,44
Septiembre			21,0	2.592.000		0,86	723,5	0,49
Octubre			13,8	2.678.400		0,94	763,2	0,57
Noviembre			8,2	2.592.000		0,94	768,7	0,58
Diciembre			6,0	2.678.400		0,85	841,1	0,51

Ilustración 136 Valores mensuales del parámetro adimensional X por unidad de área de colector.



Si tenemos en cuenta el área de colectores, obtenemos los siguientes valores de X:

Mes	Ac (m2/vivienda)	X ([])
Enero	2	1,04
Febrero		1,07
Marzo		1,14
Abril		1,12
Mayo		1,13
Junio		1,05
Julio		0,91
Agosto		0,89
Septiembre		0,98
Octubre		1,14
Noviembre		1,17
Diciembre		1,02

Ilustración 137 Valores mensuales del parámetro adimensional X.

Observamos que los valores del parámetro X se encuentra dentro del intervalo aceptable establecido entre 0 y 18.

▪ **Paso 3: Cálculo de la fracción solar mensual $f_{mes\ i}$.**

Para un sistema solar que utiliza colectores planos de líquido destinados a aplicaciones de agua caliente sanitaria, el método F-CHART, establece que la **fracción solar mensual** se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$f_{mes\ i} = 1.029 \cdot Y - 0.065 \cdot X - 0.245 \cdot Y^2 + 0.0018 \cdot X^2 + 0.0215 \cdot Y^3$$

Una vez que hemos calculado los parámetros adimensionales X e Y, no tenemos más que utilizar esta ecuación para obtener la fracción solar de cada mes del año:



Mes	Y ([])	X ([])	f (%)
Enero	0,52	1,04	40,5
Febrero	0,69	1,07	52,9
Marzo	0,99	1,14	73,1
Abril	1,20	1,12	84,8
Mayo	1,26	1,13	88,1
Junio	1,20	1,05	85,2
Julio	1,43	0,91	97,5
Agosto	1,39	0,89	95,7
Septiembre	1,29	0,98	90,3
Octubre	1,14	1,14	81,5
Noviembre	0,78	1,17	58,8
Diciembre	0,56	1,02	43,7

Ilustración 138 Valores mensuales de los parámetros adimensionales X e Y, y de la fracción solar.

Debemos de comprobar las condiciones establecidas por el CTE respecto a la fracción solar:

- En ningún mes del año la energía producida por la instalación podrá superar el 110% de la demanda energética.
- En no más de 3 meses seguidos se podrá superar el 100%.

Se puede observar cómo se cumplen satisfactoriamente ambas condiciones, ya que en ningún mes del año superamos el 110% de la demanda energética, y tampoco se tienen tres meses consecutivos en los que la fracción solar sea mayor al 100%.

Por tanto, únicamente nos queda obtener el valor anual de la fracción solar y comprobar que cumple el requisito mínimo del 70% que debe cubrir nuestra instalación solar térmica.

▪ Paso 4: Cálculo de la fracción solar anual f_{anual} .

Por último, debemos calcular el valor de cobertura solar anual, a partir de los valores de fracción solar mensuales. Viene dado por el cociente entre la energía útil captada y la carga calorífica que debe soportar la instalación durante todo el año. Utilizamos la siguiente expresión:

$$f_{anual} = \frac{\sum_{i=1}^{12} Q_{ui}}{\sum_{j=1}^{12} Q_{ai}}$$

Considerando que la energía útil captada cada mes, Q_u , viene determinada por los valores de fracción solar mediante la siguiente expresión:

$$Q_u = f \cdot Q_a$$

Podemos establecer que:



$$f_{anual} = \frac{\sum_{i=1}^{12} Q_{ui}}{\sum_{j=1}^{12} Q_{ai}} = \frac{\sum_{i=1}^{12} f_{mes,i} \cdot D_{acs,i}}{\sum_{j=1}^{12} D_{acs,i}}$$

Siendo Q_a la demanda energética de agua caliente sanitaria, D_{acs} .

Podemos ver los resultados obtenidos en la siguiente tabla:

Mes	f (%)	Dacs a 50°C (MJ)	Qu (MJ)
Enero	40,5	841,1	340,8
Febrero	52,9	745,6	394,5
Marzo	73,1	794,4	580,4
Abril	84,8	738,6	626,2
Mayo	88,1	747,6	658,7
Junio	85,2	708,4	603,6
Julio	97,5	716,5	698,5
Agosto	95,7	732,1	700,6
Septiembre	90,3	723,5	653,4
Octubre	81,5	763,2	621,9
Noviembre	58,8	768,7	451,7
Diciembre	43,7	841,1	367,9
		9120,8	6698,3

Ilustración 139 Valores mensuales de la fracción solar, demanda energética y calor útil.

Obteniendo el siguiente valor de cobertura solar anual:

$$f_{anual} = \frac{\sum_{i=1}^{12} f_{mes,i} \cdot D_{acs,i}}{\sum_{j=1}^{12} D_{acs,i}} = \frac{6698,3 \text{ MJ}}{9120,8 \text{ MJ}} \% = 73,44\%$$

$$f_{anual} = 73,44\% > 70\%$$

El valor de **cobertura solar anual obtenido es del 73,44%**, superando el valor de fracción solar mínima del 70% que nuestra instalación debe cubrir dada su ubicación en el mapa climatológico y el uso de una fuente auxiliar de energía eléctrica.

▪ Paso 5: Área de Colectores y Volumen del acumulador.

Dado que con los valores iniciales establecidos cumplimos los requisitos de cobertura solar necesarios, podemos establecer estos parámetros como válidos para nuestra instalación. Por tanto, vamos a utilizar los siguientes valores de área de colectores y volumen del tanque de acumulación:

$$A_{cp} = A_{c_persona} = 0.5 \text{ m}^2/\text{persona}$$



$$S_c = A_{c_vivienda} = 2 \text{ m}^2 / \text{vivienda}$$

$$V_{ac} = 300 \text{ l}$$

5.3.3. Consumo Energético de la Instalación con paneles solares planos.

El consumo energético de la máquina vendrá determinado por la parte de la demanda energética que nuestro sistema no puede cubrir. Su expresión es la siguiente:

$$D_{acs} = Q_u + W_e \Rightarrow D_{acs} = f \cdot D_{acs} + W_e$$

$$W_e = (1 - f) \cdot D_{acs}$$

Vamos a obtener las medidas diarias y mensuales de consumo energético para poder hacer una comparación de magnitudes con el consumo energético de las instalaciones con paneles termodinámicos.

No obtendremos la evolución puntual con valores cada diez minutos, ya que el objetivo es hacer una comparación en cuanto a la magnitud del consumo.

5.3.3.1. Evolución Diaria del Consumo Energético.

Atendiendo a la expresión del consumo energético, vemos que es función de la demanda energética y de la fracción solar. Para obtener la evolución diaria del consumo es necesario conocer la evolución diaria de la demanda y de la cobertura solar.

Los valores diarios medios de la demanda energética ya fueron calculados, por lo que tenemos que obtener unos valores diarios de fracción solar.

Mediante el método F-Chart hemos obtenido los valores mensuales de fracción solar. Sería un error utilizar este método para estimar valores horarios o diarios de fracción solar ya que, como se dijo en la introducción al método de las curvas, es un método suficientemente exacto para largas estimaciones, pero no es eficaz para cálculos semanales, diarios u horarios.

Debido a esto, no podemos calcular un valor de fracción solar para cada día del año. Por tanto, para obtener unos valores diarios medios de fracción solar **vamos a considerar que los valores mensuales de fracción solar son constantes** durante todo el mes.

Haciendo esta suposición podemos trabajar con unos **valores diarios medios de cobertura solar** que representamos en la siguiente gráfica:

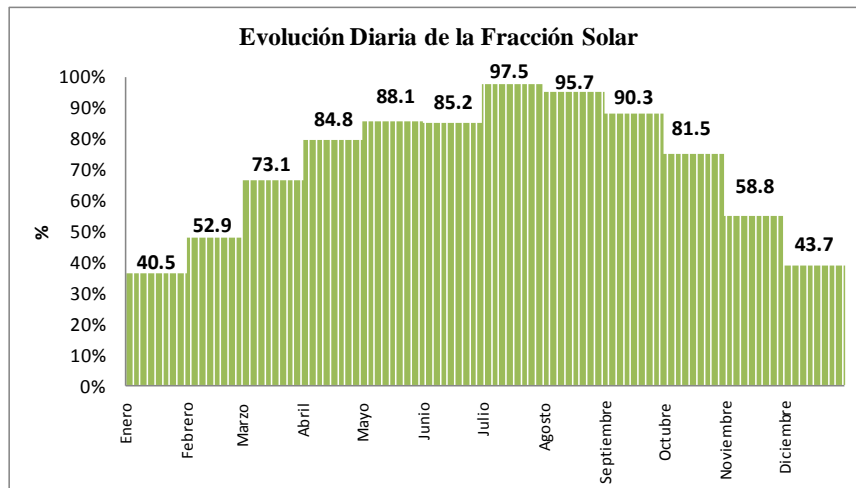


Ilustración 140 Evolución Diaria de la Fracción Solar.

A partir de las medidas diarias de demanda y fracción solar podemos calcular los valores de consumo energético y calor útil diario medio mediante sus correspondientes expresiones anteriormente expuestas. Al manejar medidas de demanda y fracción solar diarias medias, constantes durante un determinado mes, los valores de consumo energético que obtendremos también serán constantes para cada mes, teniendo valores diarios medios.

Los resultados numéricos del “*Consumo Energético Diario Medio*” para una instalación de agua caliente sanitaria con colectores solares planos se muestran en la siguiente tabla:

Mes	f (%)	Dacs Diaria a 50°C (MJ)	Qu Diario (MJ)	We Diario (MJ)
Enero	40,5	27,1	11,0	16,1
Febrero	52,9	26,6	14,1	12,5
Marzo	73,1	25,6	18,7	6,9
Abril	84,8	24,6	20,9	3,7
Mayo	88,1	24,1	21,2	2,9
Junio	85,2	23,6	20,1	3,5
Julio	97,5	23,1	22,5	0,6
Agosto	95,7	23,6	22,6	1,0
Septiembre	90,3	24,1	21,8	2,3
Octubre	81,5	24,6	20,1	4,6
Noviembre	58,8	25,6	15,1	10,6
Diciembre	43,7	27,1	11,9	15,3

Ilustración 141 Valores mensuales de Fracción Solar Diaria Media, Demanda Energética Diaria Media, Calor Útil Diario Medio y Consumo Energético Diario Medio.

Como ya hemos comentado, el consumo energético es mayor en los meses extremos del año, cuando tenemos valores de radiación y temperatura bajos, de modo que la instalación necesita en mayor medida el apoyo externo de una fuente de energía para cubrir la demanda energética.

Las medidas de consumo energético diario medio, que rigen este comportamiento, se representan en la siguiente gráfica:

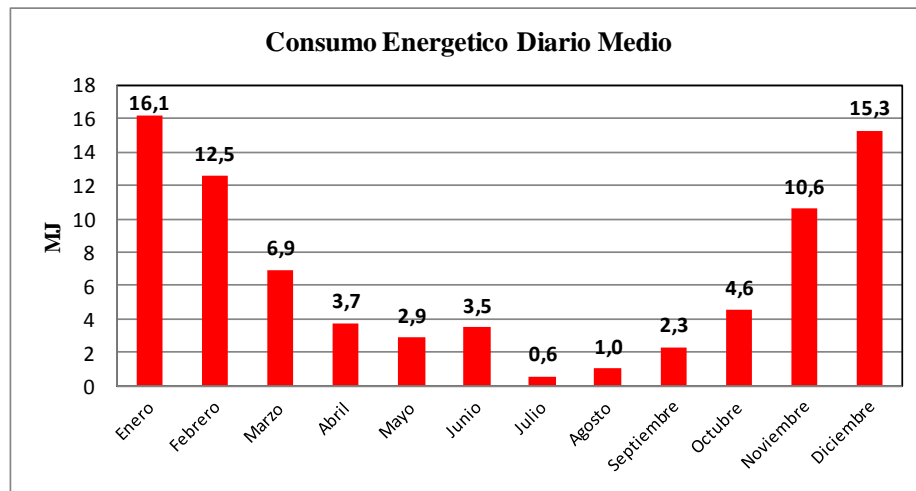


Ilustración 142 Evolución Mensual del Consumo Energético Diario Medio.

Podemos comparar los valores diarios medios mensuales del consumo energético y del calor útil, para hacernos una idea de cuándo es más útil el uso de un sistema solar con paneles solares planos:

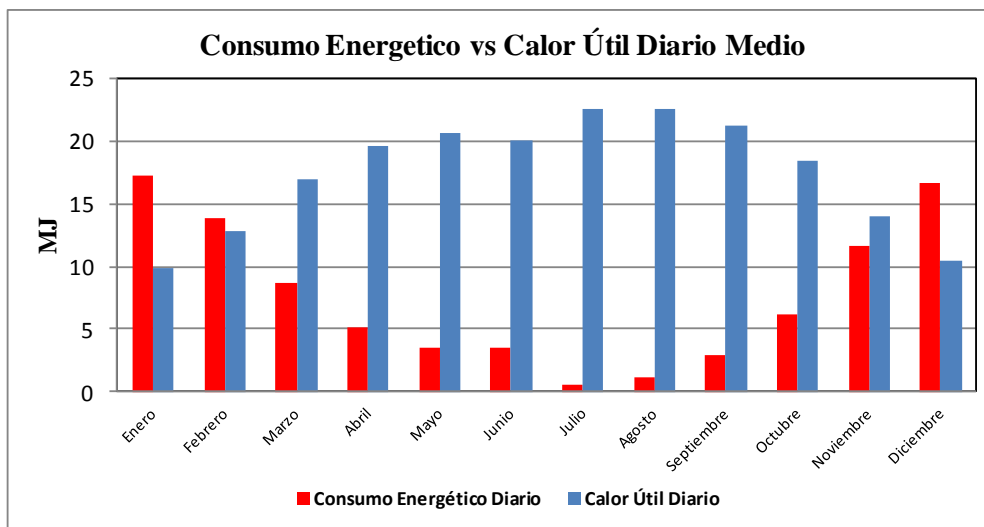


Ilustración 143 Comparativa entre los valores mensuales de Consumo Energético y Calor Útil Diario Medio.

En los meses comprendidos entre Marzo y Octubre, nuestro sistema solar es capaz de captar gran cantidad de radiación solar y convertirlo en calor útil, de modo que el consumo energético que debemos invertir para satisfacer la demanda cada día es mucho menor que el calor útil. Encontramos los máximos de calor útil en los meses de Julio, Agosto y Septiembre, siendo los meses con menor consumo energético.

Entre Noviembre y Enero, las bajas temperaturas y los bajos valores de radiación hacen que la proporción entre calor útil y consumo sea mucho más igualada, siendo los meses de Diciembre y Enero los únicos en los que necesitamos utilizar el sistema de apoyo de energía para suministrar más energía de la que nos puede aportar el sistema para satisfacer la demanda.



5.3.3.2. Evolución Mensual del Consumo Energético.

A partir de los valores mensuales de fracción solar y demanda energética, podemos obtener los valores del “**Consumo Energético Mensual**” de la instalación y del “**Calor útil Mensual**”. En la siguiente tabla presentamos las diferentes magnitudes mensuales:

Mes	f (%)	Dacs Mensual a 50°C (MJ)	Qu Mensual (MJ)	We Mensual (MJ)
Enero	40,5	841,1	340,8	500,2
Febrero	52,9	745,6	394,5	351,1
Marzo	73,1	794,4	580,4	214,0
Abril	84,8	738,6	626,2	112,4
Mayo	88,1	747,6	658,7	89,0
Junio	85,2	708,4	603,6	104,8
Julio	97,5	716,5	698,5	17,9
Agosto	95,7	732,1	700,6	31,5
Septiembre	90,3	723,5	653,4	70,1
Octubre	81,5	763,2	621,9	141,3
Noviembre	58,8	768,7	451,7	317,0
Diciembre	43,7	841,1	367,9	473,2

Ilustración 144 Fracción Solar Mensual, Demanda Energética Mensual, Calor Útil Mensual y Consumo Energético Mensual.

Vamos a comparar las magnitudes mensuales de consumo y calor útil gráficamente. La forma esperada es similar a la que tenemos con las medidas diarias, ya que son valores proporcionales determinados por el número de días de cada mes. Lo vemos en la siguiente gráfica:

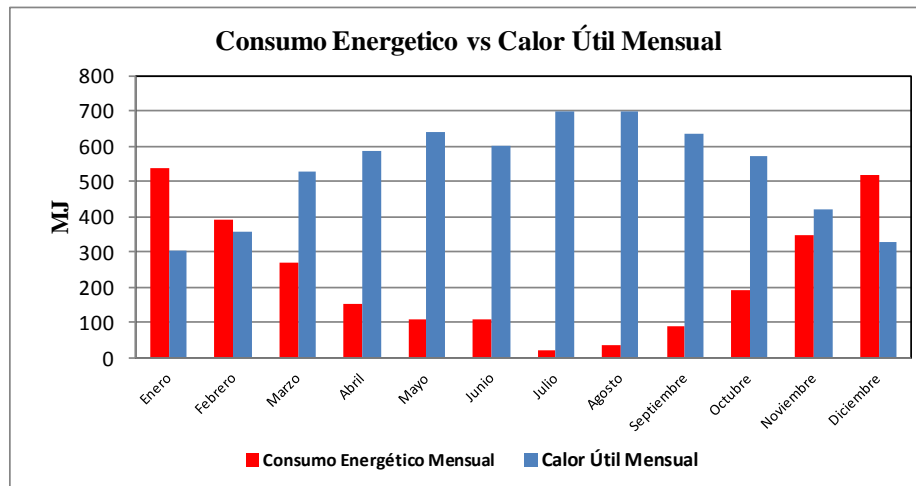


Ilustración 145 Comparativa entre el Consumo Energético Mensual y el Calor Útil Mensual.

Al igual que con los valores diarios, podemos ver cómo el calor útil suministrado por el sistema solar es predominante en los meses centrales del año, con temperaturas y valores de radiación altos, mientras que en los meses con bajos valores de temperatura y radiación tanto el consumo como el calor útil se igualan en mayor medida.



6. COMPARACIÓN ENTRE PANELES TERMODINÁMICOS Y COLECTORES TÉRMICOS.

En este apartado vamos a hacer un análisis comparativo a partir de los resultados obtenidos en los apartados dedicados a los paneles solares termodinámicos y térmicos o planos.

Compararemos ambos tipos de paneles en cuanto a su dimensionamiento, su consumo energético y su impacto medioambiental.

6.1. COMPARACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN.

Para ambos tipos de colectores el parámetro común es la cantidad de agua caliente sanitaria que debemos suministrar a los habitantes de nuestra vivienda. Para nuestra vivienda de 4 personas escogimos como depósito de acumulación un volumen de 300 litros, apropiado para satisfacer las necesidades diarias de consumo medio de agua caliente sanitaria y que es válido para la instalación con ambos tipos de colectores solares.

A partir de este volumen, se determina el área de colectores necesaria para satisfacer la demanda. En una instalación con paneles solares termodinámicos para calentar un volumen de 300 litros y poder satisfacer la demanda, experimentalmente se determina que se necesita un panel de 1.46 m^2 por persona, de modo que necesitaremos un área total de 5.84 m^2 .

En la instalación con colectores solares planos, necesitamos 0.5 m^2 por persona, necesitando un total de 2 m^2 en total.

	Volumen Depósito de Acumulación (litros)	Superficie de Captación de Colectores (m^2)
Paneles Solares Termodinámicos	300	$4 \times 1.46 = 5.84$
Paneles Solares Térmicos o Planos	300	$4 \times 0.5 = 2$

Ilustración 146 Volumen del Depósito de Acumulación (litros) y Área de Captación (m^2) para una instalación con paneles solares termodinámicos y paneles solares planos.

Podemos observar que la superficie de captación de la instalación con paneles termodinámicos es mucho mayor que con colectores solares planos. Se necesita casi el **triple más de superficie de captación con paneles termodinámicos que con paneles planos**, en concreto un **192%** más de superficie de panel termodinámico que de panel plano.

Esta diferencia se debe a que se sobredimensiona el depósito para que almacene mayor cantidad de energía, y con estos volúmenes los paneles termodinámicos necesitan un área de captadores mayor.



6.2. COMPARACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO.

Vamos a ver las diferencias de consumo energético en ambos tipos de instalaciones, tanto en magnitudes diarias como mensuales.

6.2.1. Comparación del Consumo Energético Diario.

Las medidas diarias relativas a la instalación con **paneles termodinámicos** se recogen en la siguiente tabla. Hay que tener en cuenta que en este apartado hemos obtenido medidas diarias de coeficiente de operación y de consumo energético, por lo que para poder hacer una comparación seguimos nuestra estructura de trabajo y utilizamos **medidas diarias medias** que se obtienen aplicando el promedio a los valores diarios del año.

De este modo, las **medidas diarias medias relativas a la instalación termodinámica** se recogen a continuación:

PANEL SOLAR TERMODINÁMICO	Demanda Energética Diaria (MJ)	COP Diario Medio	Calor Útil Diario Medio (MJ)	Consumo Energetico Diario Medio (MJ)
Enero	27,13	2,35	14,91	12,2
Febrero	26,63	2,47	15,18	11,5
Marzo	25,62	2,72	15,79	9,8
Abril	24,62	3,06	16,35	8,3
Mayo	24,12	3,19	16,51	7,6
Junio	23,61	3,44	16,60	7,0
Julio	23,11	3,87	17,01	6,1
Agosto	23,61	3,77	17,15	6,5
Septiembre	24,12	3,45	16,95	7,2
Octubre	24,62	3,00	16,27	8,3
Noviembre	25,62	2,58	15,26	10,4
Diciembre	27,13	2,40	15,00	12,1

Ilustración 147 Resultados Diarios de Demanda Energética, Cop, Calor útil y Consumo Energético de la instalación con paneles solares termodinámicos.

En cuanto a la **instalación con colectores solares planos**, no tenemos valores de consumo diario distintos para cada día del año, sino que se calculan directamente unos **valores diarios medios**, que se recogen en la siguiente tabla:



PANEL SOLAR TÉRMICO	Demanda Energética Diaria (MJ)	f diario (%)	Calor Útil Diario (MJ)	Consumo Energético Diario (MJ)
Enero	27,13	40,52%	10,99	16,1
Febrero	26,63	52,91%	14,09	12,5
Marzo	25,62	73,06%	18,72	6,9
Abril	24,62	84,78%	20,87	3,7
Mayo	24,12	88,10%	21,25	2,9
Junio	23,61	85,20%	20,12	3,5
Julio	23,11	97,49%	22,53	0,6
Agosto	23,61	95,70%	22,60	1,0
Septiembre	24,12	90,31%	21,78	2,3
Octubre	24,62	81,49%	20,06	4,6
Noviembre	25,62	58,76%	15,06	10,6
Diciembre	27,13	43,74%	11,87	15,3

Ilustración 148 Resultados Diarios de Demanda, Fracción Solar, Calor Útil y Consumo Energético de la instalación con paneles solares térmicos planos.

Comparamos las medidas de consumo energético diario de cada instalación en la siguiente tabla, mostrando unos **valores diferenciales o gaps entre el consumo de la instalación termodinámica y el de la instalación con paneles solares planos**:

	Panel Solar Plano	Panel Solar Termodinámico		
	Consumo Energético Diario (MJ)	Consumo Energetico Diario (MJ)	GAP Diario (MJ) Termodinámico - Plano	GAP Diario %
Enero	16,1	12,2	-3,92	-24,3%
Febrero	12,5	11,5	-1,08	-8,7%
Marzo	6,9	9,8	2,93	42,5%
Abril	3,7	8,3	4,52	120,7%
Mayo	2,9	7,6	4,74	165,2%
Junio	3,5	7,0	3,52	100,8%
Julio	0,6	6,1	5,52	954,1%
Agosto	1,0	6,5	5,45	536,7%
Septiembre	2,3	7,2	4,83	206,7%
Octubre	4,6	8,3	3,79	83,2%
Noviembre	10,6	10,4	-0,20	-1,9%
Diciembre	15,3	12,1	-3,13	-20,5%
Valor Anual	80,01	106,98	26,97	33,7%

Ilustración 149 Diferencias o gaps diarios del consumo energético entre instalaciones.

El gap mide la diferencia entre el consumo de la instalación termodinámica y la de paneles planos. Podemos observar como al principio de año, cuando las temperaturas son bajas y la radiación menor, el consumo de la instalación con paneles termodinámicos es menor que con colectores planos. En esta época, es cuando una instalación con colectores térmicos planos puede captar menor cantidad de radiación, necesitando una mayor aportación del sistema de



energía auxiliar al tener un valor de fracción solar menor y por tanto, siendo mayor su consumo energético. Para una instalación termodinámica también es la época de mayor consumo, ya que el compresor debe trabajar más al captar menos radiación y tener peores valores de coeficiente de operación, pero es capaz de tener un consumo menor que una instalación con paneles planos.

Esta situación va cambiando a medida que avanza el año y los valores de radiación y temperatura aumentan. Una instalación con paneles planos comienza a captar más radiación, su porcentaje de cobertura solar aumenta progresivamente y cada vez tiene mayor capacidad de cubrir las necesidades energéticas sin utilizar la fuente auxiliar, de modo que su consumo energético es cada vez menor.

En una instalación termodinámica el comportamiento es el mismo pero en una magnitud menor. Al tener mayores valores de temperatura ambiente y radiación, la temperatura de la placa aumenta y con ello el coeficiente de operación, la máquina es capaz de rendir mejor. Con valores más altos de coeficiente de operación, el compresor debe trabajar menos, y por tanto el consumo energético será menor que a principios de año.

Ambas instalaciones alcanzan sus valores mínimos de consumo en el ecuador del año, en Julio, y a partir de ahí, el comportamiento se invierte y los valores de consumo comienzan a aumentar hasta volver a los valores de principio de año.

Podemos ver el comportamiento rápidamente en la siguiente gráfica:

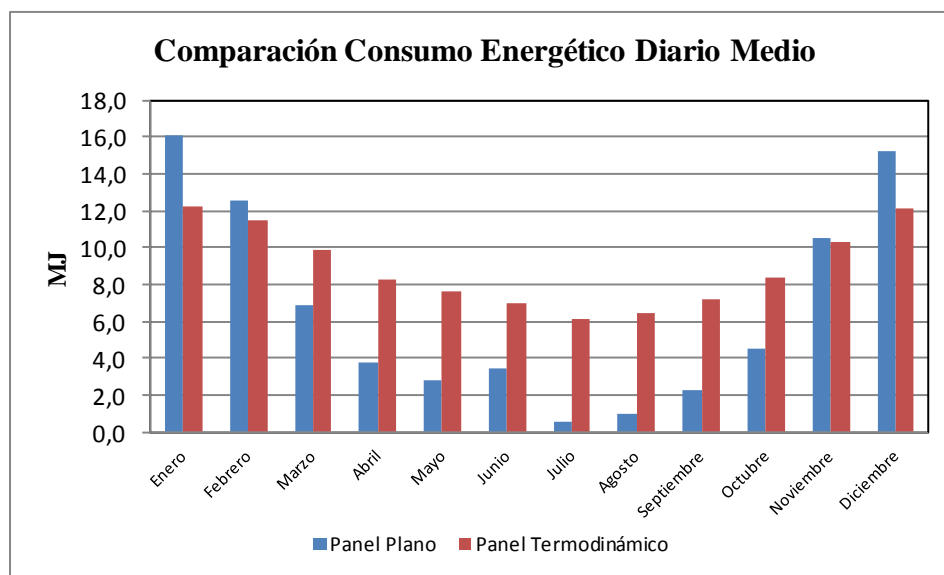


Ilustración 150 Comparación mensual del Consumo Energético Diario Medio entre instalación con paneles termodinámicos y planos.

Como vemos el comportamiento que siguen ambas instalaciones es paralelo. La gran diferencia es que con los colectores planos la diferencia de consumo entre los meses extremos y los centrales es mucho mayor que con los paneles termodinámicos.

Los colectores térmicos planos pasan de un valor diario máximo de consumo de 16.1 MJ en Enero a un valor diario mínimo de 0.6 MJ, lo que supone una reducción del 96.4% del consumo, lo que hace una curva de consumo muy curva. Esto se debe al comportamiento de la fracción solar que tiene valores muy bajos en los meses extremos del año, entre el 40-50%, frente a los altos valores que alberga en los meses centrales, entre el 80-90%, suponiendo casi un 58.4% el



aumento en la fracción solar desde el valor mínimo (Enero 40.5%) al valor máximo (Julio 97.5%).

En cambio, los paneles termodinámicos tienen una curva de consumo más plana, pasando de un valor máximo de consumo diario de 12.2 MJ en Enero a un valor mínimo de 6.1 MJ en Julio, lo que supone una reducción del 50.1%. Vemos que esta reducción es menor que en los paneles planos (96.4%), debido principalmente a que el coeficiente de operación no sufre una variación tan grande como la fracción solar. El COP sufre un aumento del 39.2% pasando del 2.35 en Enero al 3.87 en Julio.

Se puede ver claramente el distinto comportamiento que tienen comparando los valores mínimo y máximo de consumo de ambas instalaciones. Si comparamos los valores máximos, ambos en Enero, vemos un consumo energético diario de 16.1 MJ de la instalación con paneles planos frente a los 12.2 MJ de la instalación termodinámica, lo que supone con paneles planos se consume un 24.3% más que si se utilizaran paneles termodinámicos.

En cuanto a los valores mínimos, 0.6 MJ con paneles planos y 6.1 MJ con paneles termodinámicos, ambos en Julio, el consumo con paneles termodinámicos es prácticamente 10 veces mayor que con paneles planos.

Esto nos da una idea del comportamiento mucho más variable de los paneles planos, con extremos de consumo muy diferenciados entre meses fríos y calientes, frente a un comportamiento de consumo mucho más uniforme de los paneles termodinámicos, donde aun habiendo diferencias entre las épocas frías y calientes, éstas no son tan marcadas.

6.2.2. Comparación del Consumo Energético Mensual.

Una vez hecho el análisis de consumo medio diario, vamos a comparar las cifras mensuales donde se deberían observar los mismos comportamientos que con las medidas diarias.

Recogemos las medidas mensuales de la instalación con paneles termodinámicos y con paneles planos en las siguientes tablas:



PANEL SOLAR TERMODINÁMICO	Demanda Energética Mensual (MJ)	COP Mensual	Calor Útil Mensual (MJ)	Consumo Energetico Mensual (MJ)
Enero	841,08	2,35	483,43	357,66
Febrero	745,62	2,47	443,48	302,14
Marzo	794,36	2,72	501,94	292,41
Abril	738,59	3,06	497,02	241,56
Mayo	747,63	3,19	513,29	234,34
Junio	708,44	3,44	502,25	206,19
Julio	716,48	3,87	531,24	185,24
Agosto	732,06	3,77	537,72	194,33
Septiembre	723,51	3,45	514,04	209,47
Octubre	763,21	3,00	509,09	254,12
Noviembre	768,73	2,58	471,14	297,59
Diciembre	841,08	2,40	490,29	350,80
Valor Anual	9120,79	3,02	5994,93	3125,86

Ilustración 151 Resultados Mensuales de Demanda Energética, Cop, Calor útil y Consumo Energético de la instalación con paneles solares termodinámicos.

PANEL SOLAR TÉRMICO	Demanda Energética Mensual (MJ)	f mensual (%)	Calor Útil Mensual (MJ)	Consumo Energético Mensual (MJ)
Enero	841,08	40,52%	340,84	500,24
Febrero	745,62	52,91%	394,53	351,09
Marzo	794,36	73,06%	580,36	214,00
Abril	738,59	84,78%	626,19	112,40
Mayo	747,63	88,10%	658,67	88,96
Junio	708,44	85,20%	603,60	104,84
Julio	716,48	97,49%	698,53	17,95
Agosto	732,06	95,70%	700,59	31,46
Septiembre	723,51	90,31%	653,43	70,09
Octubre	763,21	81,49%	621,91	141,30
Noviembre	768,73	58,76%	451,74	316,99
Diciembre	841,08	43,74%	367,88	473,21
Valor Anual	9120,79	73,44%	6698,27	2422,52

Ilustración 152 Resultados Mensuales de Demanda, Fracción Solar, Calor Útil y Consumo Energético de la instalación con paneles solares térmicos planos.

Las diferencias o gaps mensuales entre el consumo energético de los paneles termodinámicos y los planos se presentan en la siguiente tabla:



	Panel Solar Plano	Panel Solar Termodinámico		
	Consumo Energético Mensual (MJ)	Consumo Energetico Mensual (MJ)	GAP Mensual (MJ) Termodinámico - Plano	GAP Mensual %
Enero	500,24	357,66	-142,58	-28,5%
Febrero	351,09	302,14	-48,95	-13,9%
Marzo	214,00	292,41	78,41	36,6%
Abril	112,40	241,56	129,16	114,9%
Mayo	88,96	234,34	145,38	163,4%
Junio	104,84	206,19	101,35	96,7%
Julio	17,95	185,24	167,30	932,1%
Agosto	31,46	194,33	162,87	517,6%
Septiembre	70,09	209,47	139,39	198,9%
Octubre	141,30	254,12	112,83	79,9%
Noviembre	316,99	297,59	-19,40	-6,1%
Diciembre	473,21	350,80	-122,41	-25,9%
Valor Anual	2422,52	3125,86	703,34	29,0%

Ilustración 153 Diferencias o gaps mensuales del consumo energético entre instalaciones.

Los valores mensuales siguen el mismo patrón que las medidas diarias y que podemos resumir detalladamente:

- En los **colectores solares térmicos planos** se observa una curva de consumo mensual muy pronunciada determinada por las grandes variaciones del valor de cobertura solar a lo largo del año. En los meses extremos, donde predomina el frío y los valores bajos de radiación, se tienen unos valores de fracción solar bajos que implican usar en mayor medida fuentes auxiliares de energía para satisfacer la demanda, teniendo valores altos de consumo energético. La diferencia entre el mes con mayor consumo y el mes con menor consumo representa un **96.4%** (500.2 MJ en Enero vs 17.9 MJ en Julio)
- En los **paneles solares termodinámicos** se tiene una curva de consumo mensual más plana, debido a que el coeficiente de operación no sufre cambios tan grandes como la fracción solar. Entre el mes con mayor y menor consumo se observa una diferencia del **48.2%** (357.6 MJ en Enero y 185.2 MJ en Julio), lo que nos dice que las diferencias de consumo a lo largo del año son menores que con paneles planos, teniendo un comportamiento más uniforme.

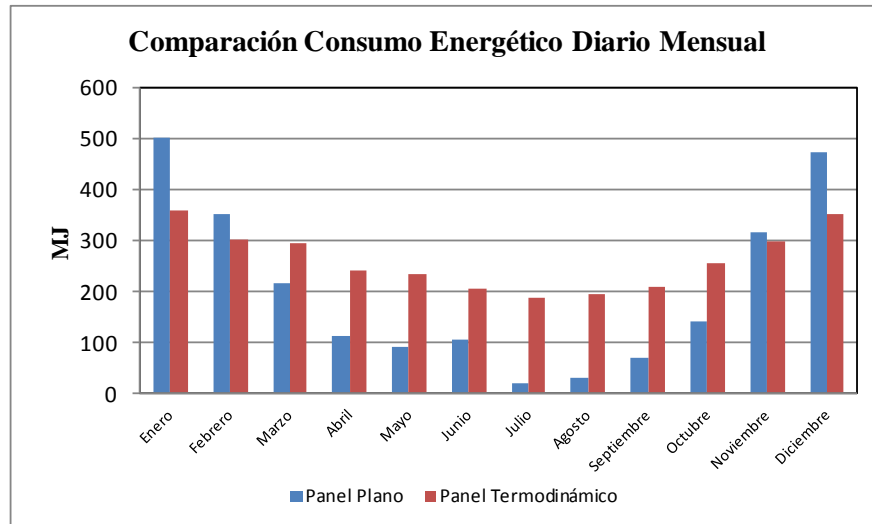


Ilustración 154 Comparación del Consumo Energético Mensual entre instalación con paneles termodinámicos y planos.

- En los **meses fríos o extremos** (Enero, Febrero, Noviembre y Diciembre), el consumo mensual de la instalación con colectores planos es mayor que con termodinámicos. Se debe principalmente a la baja capacidad de captar radiación solar de estos paneles en esta época, teniendo valores de fracción solar mucho más bajos que durante el resto del año, ya que los valores de radiación y temperatura ambiente son bajos.
- En los **meses centrales** este comportamiento se invierte, de modo que el consumo de la instalación termodinámica es mayor. Se debe a que la capacidad de captar radiación de los colectores planos aumenta en gran medida, teniendo valores de fracción solar muy altos capaces de satisfacer la demanda energética casi por sí solos.
- En total, vemos que a lo largo del año utilizando una instalación con paneles solares termodinámicos el consumo energético es un **29% anual** mayor que con colectores térmicos. Se debe a la necesidad permanente que tienen los paneles termodinámicos de usar un compresor, que debe estar encendido durante todo el día consumiendo electricidad a diferencia de los paneles planos, que durante buena parte del año pueden satisfacer la demanda prácticamente con la única aportación de la radiación solar.

6.3. COMPARACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL. EMISIONES DE CO₂.

Para hacer un análisis del impacto ambiental, debemos de tener en cuenta los principales contaminantes emitidos por el uso de las diferentes fuentes de energía. En este caso **únicamente vamos a tener en cuenta la emisión de CO₂**, ya que es el contaminante mayoritario, despreciando la aportación que puedan hacer otros contaminantes como CO, NO_x o SO_x.



Según los datos del Ministerio de Medio Ambiente, la tasa de CO₂ para el año 2010 era de **0,4kg de CO₂ por cada kWh de electricidad**. Éste será el dato que vamos a utilizar para obtener la cantidad de contaminante que se desprende a la atmósfera.

Para ello debemos utilizar los resultados de consumo eléctrico obtenido y utilizar la fórmula:

$$\text{Emisión } CO_2(kg) = Tasa_{CO_2} \left(\frac{kg}{kWh_e} \right) \cdot Consumo_{eléctrico}(kWh_e) = T_{CO_2} \cdot C_e$$

Presentamos los resultados en las siguientes tablas:

PANEL SOLAR TERMODINÁMICO	Consumo Energetico Mensual (MJ)	Consumo Energético Mensual (KWh)	Tasa CO2 kg CO2/KWh	Emision Mensual CO2 (kg)
enero	381,29	99,35	0,4	39,74
febrero	323,57	83,93		33,57
marzo	309,44	81,23		32,49
abril	252,18	67,10		26,84
mayo	240,21	65,09		26,04
junio	213,57	57,28		22,91
julio	192,08	51,46		20,58
agosto	203,38	53,98		21,59
septiembre	218,45	58,19		23,27
octubre	263,51	70,59		28,24
noviembre	314,48	82,66		33,07
diciembre	378,72	97,44		38,98
Valor Anual	3290,88	868,30		347,32

Ilustración 155 Emisiones mensuales de CO₂ para una instalación con paneles solares termodinámicos

PANEL SOLAR TÉRMICO	Consumo Energetico Mensual (MJ)	Consumo Energético Mensual (KWh)	Tasa CO2 kg CO2/KWh	Emision Mensual CO2 (kg)
enero	500,24	138,96	0,4	55,58
febrero	351,09	97,53		39,01
marzo	214,00	59,44		23,78
abril	112,40	31,22		12,49
mayo	88,96	24,71		9,88
junio	104,84	29,12		11,65
julio	17,95	4,99		1,99
agosto	31,46	8,74		3,50
septiembre	70,09	19,47		7,79
octubre	141,30	39,25		15,70
noviembre	316,99	88,05		35,22
diciembre	473,21	131,45		52,58
Valor Anual	2422,52	672,92		269,17

Ilustración 156 Emisiones mensuales de CO₂ para una instalación con paneles solares térmicos o planos.



	Emisión Mensual CO2 (kg)		GAP Mensual (kg CO2) Termodinámico - Plano	GAP Mensual %
	PANEL TERMODINÁMICO	PANEL PLANO		
enero	39,74	55,58	-15,84	-28,5%
febrero	33,57	39,01	-5,44	-13,9%
marzo	32,49	23,78	8,71	36,6%
abril	26,84	12,49	14,35	114,9%
mayo	26,04	9,88	16,15	163,4%
junio	22,91	11,65	11,26	96,7%
julio	20,58	1,99	18,59	932,1%
agosto	21,59	3,50	18,10	517,6%
septiembre	23,27	7,79	15,49	198,9%
octubre	28,24	15,70	12,54	79,9%
noviembre	33,07	35,22	-2,16	-6,1%
diciembre	38,98	52,58	-13,60	-25,9%
Valor Anual	347,32	269,17	78,15	29,0%

Ilustración 157 Comparativa de Emisiones mensuales de CO₂.

Comparando los valores totales de emisiones, observamos que la cantidad de CO₂ emitida en un año es superior utilizando paneles solares termodinámicos que mediante colectores solares planos.

En concreto, los 347.3 Kg de CO₂ anuales emitidos utilizando una instalación de agua caliente sanitaria con paneles termodinámicos representan un **29% anual** más de emisiones que los 269.2 kg de CO₂ anuales que se generan utilizando colectores solares térmicos.

Esto es una consecuencia directa de la diferencia existente en el consumo energético entre ambas instalaciones, que también se establecía en un 29% anual mayor para los paneles termodinámicos. Al ser valores proporcionales, las diferencias en emisiones son iguales a las diferencias existentes en el consumo energético.

El principal motivo de esta diferencia, es la necesidad permanente que tienen los paneles termodinámicos de usar un compresor, que debe estar encendido durante todo el día consumiendo electricidad. En cambio en instalaciones con colectores térmicos, el consumo eléctrico sólo se debe al uso de una fuente auxiliar que aporte la energía que no puede cubrir la instalación solar

7. CONCLUSIONES.

En este apartado vamos a recopilar de forma resumida las principales conclusiones que se obtienen de nuestro estudio.

▪ Paneles Solares Termodinámicos.

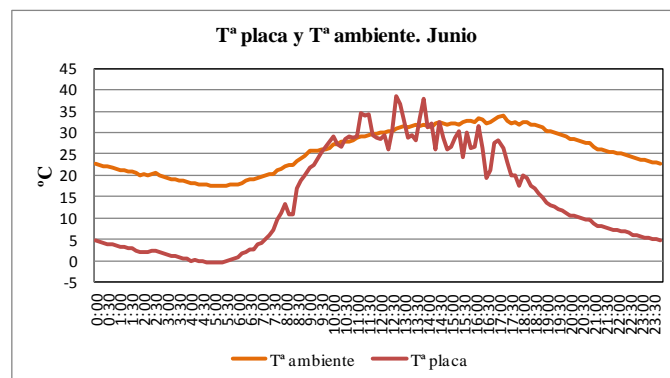
El modelo utilizado para el estudio de los paneles termodinámicos está basado en los parámetros: Temperatura de evaporación, Coeficiente de Eficiencia Energética u Operación y Consumo Energético.

i) Temperatura de evaporación:

Suponiendo como hipótesis, que la temperatura del fluido refrigerante en el evaporador es igual a la temperatura de la placa, obtenemos un modelo de función que depende de la temperatura ambiente y de la radiación solar.

$$T_{placa}(^{\circ}\text{C}) = T_{amb} + K(R_{global}) = T_{amb} + 10^{\circ}\text{C} + \frac{28^{\circ}\text{C}}{1.000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \cdot \left(R_{global} - 1.000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$$

La temperatura de la placa sigue un patrón diario, que varía en función de la temperatura ambiente y de la intensidad de la radiación solar. Se distinguen tres intervalos horarios:



- **Primer sector del día:** desde las 0:00 de la noche hasta el amanecer (6:00-7:30), al no haber radiación solar, la temperatura de la placa evoluciona paralela a la temperatura ambiente, siendo alrededor de 18°C menor.
- **Sector central del día:** una vez que amanece y la placa empieza a calentarse por la radiación solar incidente, la temperatura de la placa empieza a crecer a mayor ritmo que la temperatura ambiente, en una magnitud que determinaremos a partir de un parámetro K . En determinadas condiciones de temperatura exterior y de radiación solar, la temperatura del panel puede superar a la temperatura ambiente.



- **Sector final del día:** cuando comienza a anochecer, y la radiación solar cae hasta cero, se repite el comportamiento del primer sector del día.

La **curva media de la temperatura de evaporación** se caracteriza por la presencia de picos de alta y baja intensidad, correspondientes con picos de alta y baja radiación. Los cambios bruscos en los valores de temperatura de evaporación se deben a cambios grandes en la radiación incidente, que pueden deberse a la presencia de obstáculos que impiden que se capte radiación, como la presencia de nubes.

ii) Coeficiente de Eficiencia Energética u Operación:

Obtenemos la curva teórica del coeficiente de eficiencia energética u operación en función de la temperatura de evaporación, a partir de las condiciones de funcionamiento y del ciclo de refrigeración:

- **Temperatura de evaporación del refrigerante:** igual a la temperatura de la placa (comprendido entre -20°C y 30°C).
- **Temperatura de condensación:** igual a la temperatura de suministro del agua caliente sanitaria (50°C) más un salto térmico por irreversibilidades en el intercambiador de calor (8°C).
- **Recalentamiento** (5°C) y **Subenfriamiento** (8°C).
- **Rendimientos:** isentrópico (0.8), eléctrico y mecánico (producto de 0.75).
- **Pérdidas** (15% de pérdidas de calor en alta presión).

Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

T_{ev} (°C)	T_{cd} (°C)	Recalentamiento (°C)	Subenfriamiento (°C)	Q_{cd} (kW)	W_{comp} (kW)	COP Teórico
-20	58	5	8	1,56	0,75	2,09
-15	58	5	8	1,5	0,67	2,25
-10	58	5	8	1,45	0,60	2,42
-5	58	5	8	1,39	0,52	2,67
0	58	5	8	1,35	0,47	2,89
5	58	5	8	1,3	0,40	3,25
10	58	5	8	1,26	0,35	3,63
15	58	5	8	1,23	0,31	4,01
20	58	5	8	1,19	0,25	4,70
25	58	5	8	1,16	0,21	5,44
30	58	5	8	1,13	0,17	6,52

Ilustración 158 Puntos de funcionamiento de la instalación de paneles termodinámicos. Temperatura de evaporación, potencia del condensador, trabajo del compresor y coeficiente de operación. Valores obtenidos mediante la simulación del ciclo de refrigeración con el programa "Solkane 7.0"

Con estos puntos obtenemos la **curva de funcionamiento teórica** y ajustamos sus valores a una curva de regresión polinómica de grado dos:

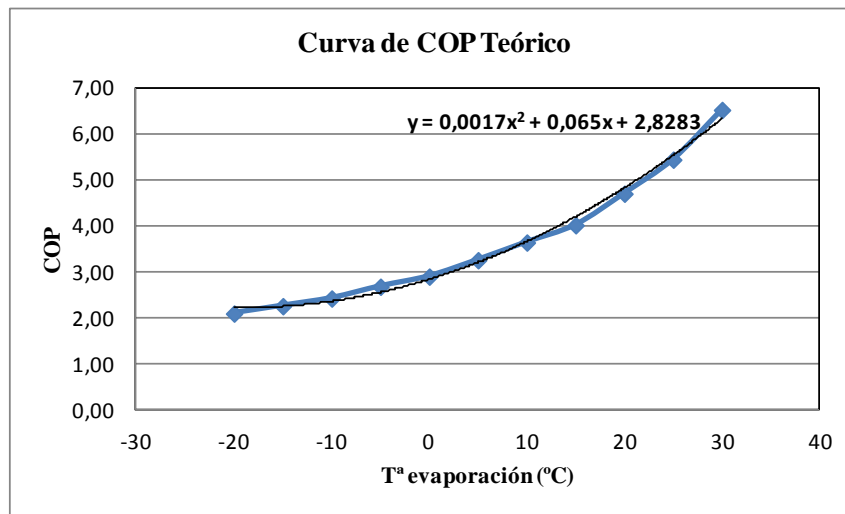


Ilustración 159 Curva teórica del coeficiente de operación frente a la temperatura del evaporador y recta de regresión. Obtenida a partir de los puntos de funcionamiento de la instalación.

Comparando los valores teóricos de COP con los resultados experimentales de la máquina:

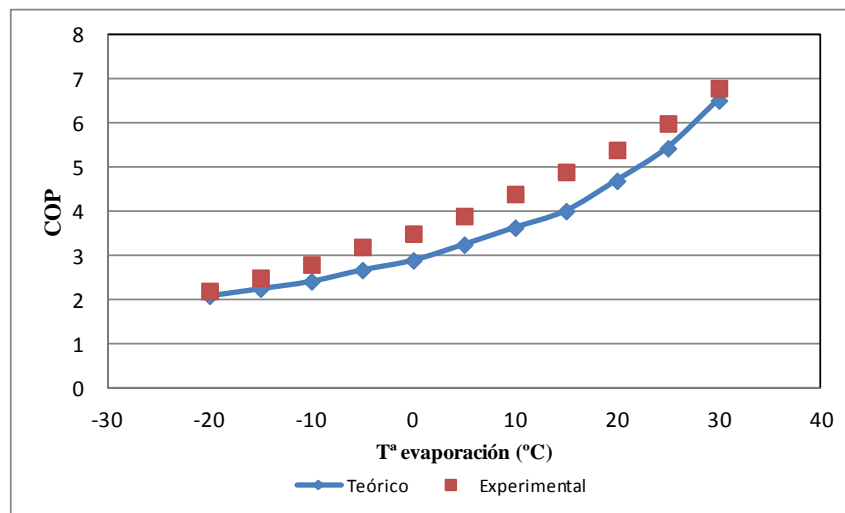
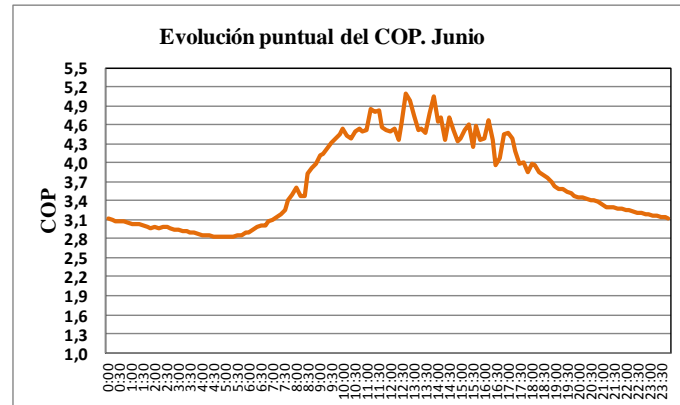


Ilustración 160 COP teórico vs COP Experimental en función de la Temperatura de la placa.

La **curva teórica** calculada a partir de las condiciones de funcionamiento de la instalación se asemeja a los valores experimentales, aunque **alcanza valores inferiores de coeficiente de eficiencia energética u operación**.

La ecuación teórica del coeficiente de operación que obtenemos, aplicando una recta de regresión es la siguiente:

$$COP = 0,0017 \cdot T_{placa}^2 + 0,065 \cdot T_{placa} + 2,8283$$

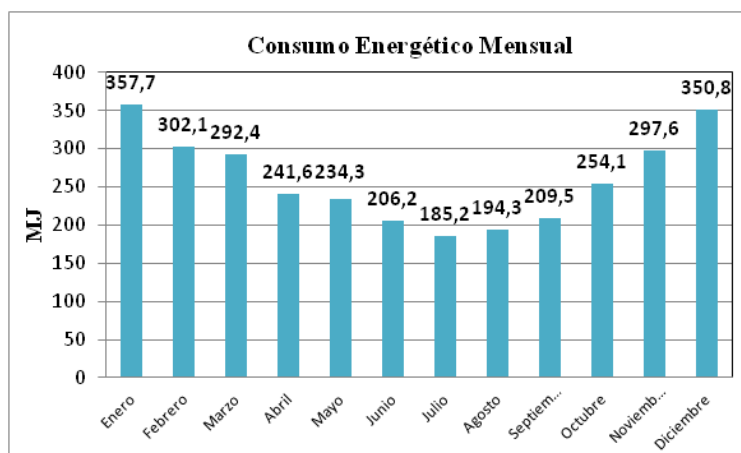


Pudiendo concluir:

- Se obtienen **mejores valores de COP a mayores valores de temperatura de evaporación**. En las horas centrales del día, cuando la radiación es mayor, la temperatura de la placa es mayor y por eso los valores del coeficiente de operación son mejores.
- En los **meses centrales del año**, con valores más altos de radiación, temperatura ambiente y temperatura de evaporación o de placa, se obtienen **valores más altos de COP**.
- Los **picos de eficiencia** se corresponden con picos de temperatura de evaporación, que como ya explicamos, se deben a la existencia de picos de radiación.

iii) Consumo Energético de los Paneles Termodinámicos:

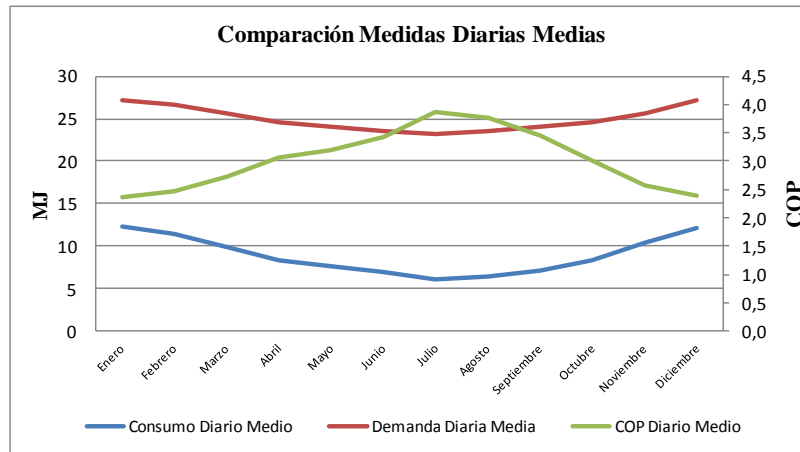
Los **paneles solares termodinámicos** siguen una **curva de consumo mensual y diario medio**, marcada por altas necesidades de consumo en los meses fríos. En los meses centrales del año, sobre todo en verano, el consumo es menor debido a que la necesidad de agua caliente es menor que en el resto del año (Gap de **48.2% de desviación** entre mes de mayor y menor consumo (Enero, 357.7 MJ vs Julio, 185.2 MJ).



El consumo energético diario y mensual es **menor en los meses centrales del año** debido a dos factores fundamentalmente:



- La **demanda energética media diaria y mensual es menor en los meses centrales del año** debido a que las necesidades de agua caliente son menores en los meses con temperaturas más altas que en el resto del año.
- En los meses centrales del año se tienen **valores del COP más altos** ya que la temperatura de la placa es mayor que en el resto del año (debido a mayores valores de radiación y temperatura ambiente), y la relación consumo/demanda se vuelve más pequeña.



- La suma de los dos efectos nos lleva a tener **valores de consumo energético mensual y consumo diario medio menores en los meses centrales que durante el resto del año.**

▪ Colectores Solares Planos.

El modelo utilizado para el estudio de los colectores solares planos está basado en los parámetros de Fracción Solar y Consumo Energético.

i) Fracción o Cobertura Solar:

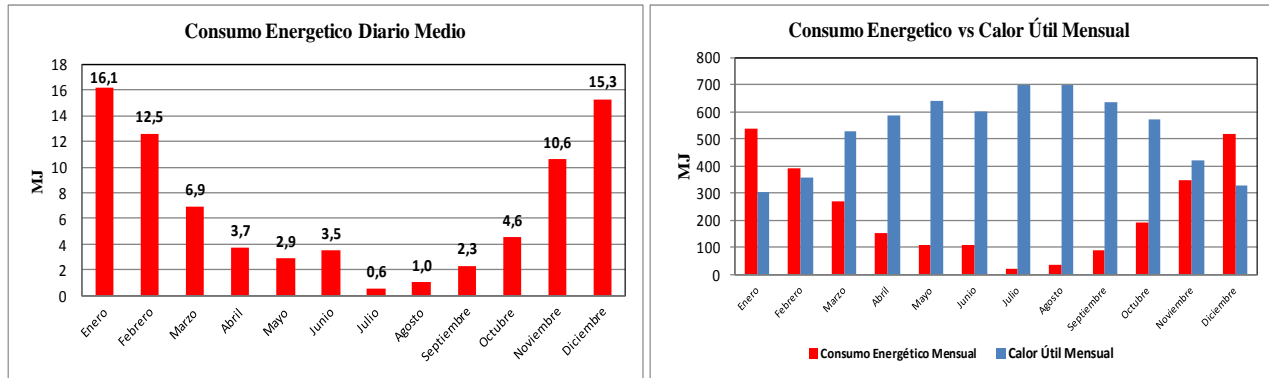
Mediante el método de las curvas o F-Chart obtenemos unas medidas mensuales de fracción solar que satisfagan el 70% mínimo que nuestra instalación debe cubrir.

$$f_{anual} = 73,44\% > 70\%$$

El valor de **cobertura solar anual obtenido es del 73,44%**, superando el valor de fracción solar mínima del 70% que nuestra instalación debe cubrir dada su ubicación en el mapa climatológico y el uso de una fuente auxiliar de energía eléctrica.

ii) Consumo Energético de los Colectores Térmicos Planos:

Una vez calculadas las medidas mensuales de fracción solar, y considerándolas uniformes para cada mes, obtenemos unas medidas diarias medias y unas medidas mensuales:



Se observa una **curva de consumo mensual y diario muy pronunciada**, determinada por las grandes variaciones de la cobertura solar a lo largo del año (Gap de **96.4% de desviación** entre el mes de mayor y menor consumo). Esto es debido a la gran variación de la fracción solar mensual, muy baja en los meses con frío y valores bajos de radiación, frente a los altos valores en los meses centrales, con mayores temperaturas y valores de radiación.

▪ **Paneles Solares Termodinámicos frente a Colectores Solares Planos.**

i) **Dimensionamiento de la instalación**

La **superficie de captación de la instalación con paneles termodinámicos es mayor que con paneles solares planos**, necesitando casi el triple más de superficie de captación (**192%** más de superficie).

ii) **Consumo Energético**

En los **colectores solares térmicos planos** se observa una **curva de consumo mensual y diario muy pronunciada** determinada por las grandes variaciones de la cobertura solar a lo largo del año (Gap diferencial de **96.4%** entre el mes de mayor y menor consumo)

Los **paneles solares termodinámicos** tienen una **curva de consumo mensual y diario más plana**, debido a que el coeficiente de operación o COP no sufre cambios tan grandes a lo largo del año como la fracción solar (Gap diferencial de **48.2%** entre el mes de mayor y menor consumo).

En los **meses fríos o extremos del año** (Enero, Febrero, Noviembre y Diciembre), el **consumo mensual de la instalación con colectores solares planos es mayor que la instalación con paneles termodinámicos**, debido a los bajos valores de fracción solar (bajos valores de radiación y temperatura ambiente).

En los **meses centrales del año** este comportamiento se invierte, siendo el **consumo energético de la instalación termodinámica mayor**, debido a que los colectores planos alcanzan valores de fracción solar muy altos capaces de satisfacer la demanda energética casi por sí solos.



En el balance total del año, se puede concluir que utilizar **una instalación con colectores solares planos supone un ahorro de consumo energético (29% anual** de ahorro de consumo energético). Se debe a la necesidad permanente que tienen los paneles termodinámicos de usar un compresor, y a la alta capacidad de los colectores planos de aprovechar la energía del sol durante buena parte del año reduciendo en gran medida la necesidad de un aporte auxiliar de energía.

iii) Impacto Ambiental. Emisiones de CO₂

Es una conclusión consecuencia directa de los resultados del consumo energético: la **tasa anual de CO₂ emitida es superior utilizando paneles solares termodinámicos** que mediante colectores solares planos, debido a que su consumo energético también es superior. En concreto, al igual que el consumo anual, es un **29% mayor** con paneles termodinámicos que utilizando colectores solares planos.



8. BIBLIOGRAFIA.

- “Atlas de la demanda eléctrica Española. Proyecto INDEL”. Red Eléctrica de España. S.A. Carmen Rodríguez Villagarcía, 1999.
- “Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HE Ahorro de Energía, Sección HE 4: Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria”.
- “Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura”, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2009.
- Manuales de Energías Renovables “Energía Solar Térmica”, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2009.
- “Sistemas solares térmicos de baja temperatura, 1ª edición”. José Juan de Felipe Blanch, Joan Antoni López Martínez, 1999.
- “Energía solar térmica, 1ª edición”, Martí Rosas Casals, 2001.
- “Fundamentos de transferencia de calor, 4ª edición”. Frank P. Incropera, David P. Dewitt.
- Revista especializada Energy, artículo “Theoretical model and experimental validation of a direct-expansion solar assisted heat pump for domestic hot water applications”. Amancio Moreno Rodríguez (Universidad Carlos III), Marzo 2012.
- Dossier Técnico Empresa SolarPST: “Panel Solar Termodinámico. Última Generación”.
- Revista especializada “Energías Renovables”, Número 50 “Paneles Solares Termodinámicos, operativos 24 horas al día”. Adriana Castro, Septiembre 2006.
- PFC “Instalación Solar Térmica para producción de ACS en edificio de viviendas en Salamanca”. Zaida Salamanca Félix.

Páginas web:

- <http://www.censolar.es/>
- www.capsolarcst.com Documento “Capsolar CST: Paneles Solares Termodinámicos”.
- <http://www.solarpst.com/>
- <http://www.tecnocosas.es/paneles-solares-termodinamicos/>
- <http://www.icarus-solar.com/esTermica/Paneles-Termodinamicos.html>
- <http://www.solarweb.net>
- <http://www.tecnocosas.es/paneles-solares-termodinamicos/>
- www.mexichemfluor.com Documento “Refrigerant guide.pdf”, 2010.